

X 線天文衛星ひとみと Swift を用いた
Crab Pulsar からの X 線パルス放射の観測研究

埼玉大学 理工学研究科
物理機能系専攻 物理学コース
田代・寺田研究室

16MP105 大清水 健也

平成 30 年 2 月 5 日

概 要

中性子星は、半径が約 10 km で質量が太陽程度の超高密度天体であり、とても短い周期で回転するパルサーとしての性質も持つ。パルサーは安定した磁気圏構造からの電磁波として、電波から X 線、ガンマ線まで幅広く観測されるが、磁気圏での放射領域や放射過程は複数の説がある。さらに、ごく一部のパルサーでは電波帯域でのみ、通常のパルスよりも数十倍以上の強度を持つ巨大電波放射 (Giant Radio Pulse: GRP) が観測され、その放射のメカニズムはさらなる謎となっている。

かに星雲中心にある Crab パルサーは、約 33 ミリ秒の自転周期の間に全波長帯で 2 度明滅するパルサーで、安定した電磁波放射をすることで知られる。回転エネルギーで駆動される電磁波放射としてはパルサーの中でも最大級であるため、自転周期の安定度を利用して、最も放射エネルギーの大きい X 線帯域で検出器の絶対有効面積や時刻較正によく用いられる。さらに近年の電波観測で GRP も多く発見されており、磁気圏活動の観測には適した天体である。

2016 年に打ち上げられた X 線天文衛星「ひとみ」は、搭載検出器の時刻較正を行うため、現在運用中の X 線天文衛星 Swift と日本の低周波数帯地上電波望遠鏡を用いて、Crab パルサーの同時観測を行った。「ひとみ」は、絶対時刻精度が 35 μsec 以内を目標に、GPS 受信機を搭載し時刻配信も注意深く設計された衛星で、本観測では 2 - 300 keV の広帯域を高い時間分解能で観測することができた。

本研究では、(1)「ひとみ」の X 線観測の絶対時刻精度の検証と、(2) Crab パルサーの X 線パルス放射の特性について解析を行った。(1) では、電波観測で決定されたパルス到来時刻を基準に、同エネルギー帯域の「ひとみ」と Swift の各検出器の絶対時刻精度を評価した。また、(2) の事前解析として検出器の時間分解能の精度と検出されたパルス幅を比較し、特にひとみ/SXS (時間分解能: 5 μsec) では、同エネルギー帯域で異なる時間分解能を持つ Swift/XRT (時間分解能: 1.7 msec) よりも、パルス波形が鋭く検出できることを確認した。(2) では、Crab パルサーの 2 つのパルスの強度比をエネルギー毎に導出し、主パルス成分が副パルス成分よりもエネルギースペクトルがソフトであることを確認した。特に 2 - 300 keV 帯域におけるパルス強度比のエネルギー依存性を、過去の観測よりも高い精度で計測した。さらに、電波望遠鏡で観測した GRP 発生時刻のデータを利用し、電波帯域での増光である GRP と同期した、2 - 300 keV 帯域の X 線パルスの増光の上限値を求めた。その結果、GRP に同期して X 線パルスの有意な増光やパルス形状の乱れは観測されなかった。これは、GRP 放射が磁気構造を変えずに、シンクロトロン放射をする粒子数を一時的に増加させる等、局所的な現象であることが示唆される。ただし、緩い上限値であるため、エネルギー収支として見えていないだけかもしれない、将来の 大有効面積の検出器が期待される。

目次

第 1 章	序論	6
1.1	中性子星	6
1.1.1	中性子星の形成	6
1.1.2	中性子星の質量と半径	6
1.1.3	中性子星の内部構造	8
1.2	パルサー	9
1.2.1	パルサーの周期と磁場	9
1.2.2	パルサー磁気圏からの電磁放射機構	11
1.2.3	パルサー風とパルサー星雲	12
1.2.4	パルサーの分類と多様性	12
1.3	Giant Radio Pulse	14
1.4	Crab パルサー	16
1.4.1	Crab パルサーの特徴	16
1.4.2	Crab パルサーでの Giant Radio Pulse	18
1.5	本論文の目的	20
第 2 章	X 線観測機器	21
2.1	X 線天文衛星「ひとみ」	21
2.1.1	Soft X-ray Spectromator: SXS	21
2.1.2	Hard X-ray Imager: HXI	23
2.1.3	Soft Gamma-ray Detector: SGD	24
2.1.4	ひとみ衛星の時刻システム	27
2.2	X 線天文衛星 Swift	28
2.2.1	Burst Alert Telescope: BAT	30
2.2.2	X-Ray Telescope: XRT	31
第 3 章	同時観測と Data Reduction	33
3.1	X 線と電波の同時観測	33
3.2	Data Reduction	34
3.2.1	Barycentric Correction	34
3.2.2	各検出機器の Data Reduction	34
3.3	X 線の Pulse Profile: 畳み込みライトカーブ	37
第 4 章	絶対時刻精度とパルス検出性能の検証	39
4.1	絶対時刻精度の評価	39
4.1.1	評価方法	39
4.1.2	各検出器の絶対時刻差	39

4.1.3	パルス到来時刻の他検出器との比較	41
4.1.4	考察	41
4.2	検出器の時間分解能と Pulse 検出性能	42
4.2.1	検証方法	42
4.2.2	検証結果	43
4.2.3	考察	45
第 5 章	Crab パルサーの Pulse 特性解析	46
5.1	Main・Inter Pulse 強度解析	46
5.1.1	解析方法	46
5.1.2	解析結果	47
5.1.3	考察	48
5.2	Giant Radio Pulse 解析	49
5.2.1	GRP イベントの決定	49
5.2.2	解析方法	49
5.2.3	解析結果	50
5.2.4	X 線帯域増光の上限値	55
5.2.5	考察	59
第 6 章	結論	60
付録 A	パルサーの磁気双極子モデル	66
付録 B	Data Reduction の詳細	68
B.1	SGD: 光電吸収モードのセレクション条件	68
B.2	XRT: 衛星の姿勢によるセレクション	68
付録 C	Fitting 関数	70
C.1	各種 Fitting 関数	70
C.2	畳み込みライトカーブの Fitting 結果	71
付録 D	GRP 解析の詳細	73

目 次

1.1	恒星質量とコンパクトオブジェクトへの進化過程の関係	7
1.2	各モデルに対する中性子星質量と半径の関係	7
1.3	中性子星内部の断面図	8
1.4	$P-\dot{P}$ diagram	10
1.5	Glitch の観測例	10
1.6	パルサーの放射領域	11
1.7	パルサー風とパルサー星雲の形成	12
1.8	Giant Radio Pulse の観測例	15
1.9	Crab パルサー画像	16
1.10	かに星雲と Crab パルサーの Wide Band Spectrum	17
1.11	Crab パルサーの Wide Band Pulse Profile	17
2.1	ひとみ衛星イメージ	22
2.2	SXS センサー部、マイクロカロリメータのピクセル図、Dewar	23
2.3	HXI 断面図	24
2.4	コンプトンコーンのイメージ	26
2.5	SGD 断面図	26
2.6	ひとみ衛星の時刻システムネットワーク	27
2.7	Swift 衛星イメージ	28
2.8	BAT イメージ	30
2.9	符号化マスクの検出イメージ	31
2.10	XRT 概要図	32
3.1	HXI region selection	36
3.2	ひとみ、Swift 衛星各検出器での Crab パルサーのライトカーブ	36
3.3	畳み込みライトカーブの作成方法	37
3.4	Crab パルサーの Pulse Profile (畳み込みライトカーブ)	38
4.1	Gauss 関数 Fitting と Main Pulse Peak 位置	40
4.2	パルス到来時刻の他検出器との比較	41
4.3	時間分解能の落とし方のイメージ	43
4.4	時間分解能を落としての Gauss 関数 Fitting	43
4.5	パルス幅と時間分解能の関係	44
4.6	時間分解能とパルス Peak 位置の関係	44
5.1	パルスの強度判定の仕方	47
5.2	Crab パルサーの Main と Inter のパルス強度比	48

5.3	電波観測による Crab パルサーからの GRP selection	49
5.4	GRP 発生 cycle の各検出器の畳み込みライトカーブ	51
5.5	検出器を足し合わせた GRP 畳み込みライトカーブ	52
5.6	GRP 発生 cycle の各検出器の畳み込みライトカーブ (3 cycle)	53
5.7	検出器を足し合わせた GRP 畳み込みライトカーブ (3 cycle)	54
5.8	各 cycle での増光率 (ひとみ検出器)	56
5.9	各 cycle での増光率 (Swift 検出器)	57
5.10	各 cycle での増光率 (ひとみ + Swift)	58
A.1	パルサーの磁気双極子モデル	66
B.1	Swift 衛星の視線方向	69
B.2	各期間における XRT の Crab Pulse Profile	69
C.1	各関数での Fitting 結果	71
C.2	各 Fitting で決定された Pulse Peak 位置	72
D.1	GRP 発生 cycle の各検出器の畳み込みライトカーブ MP-GRP (1/5, 1/11, 1/63 Phase bin)	78
D.2	検出器を足し合わせた GRP 畳み込みライトカーブ MP-GRP (1/5, 1/11, 1/63 Phase bin)	79
D.3	GRP 発生 cycle の各検出器の畳み込みライトカーブ IP-GRP (1/5, 1/11, 1/63 Phase bin)	80
D.4	検出器を足し合わせた GRP 畳み込みライトカーブ IP-GRP (1/5, 1/11, 1/63 Phase bin)	81

表 目 次

1.1	放射エネルギー源によるパルサーの分類	13
1.2	Giant Radio Pulse の観測された主な天体	14
1.3	電波望遠鏡と同時観測した Crab パルサーの Giant Radio Pulse 一覧	19
2.1	ひとみ衛星の主要パラメータ	22
2.2	LOCAL_TIME クロックの時間分解能 [89]	27
2.3	Swift 衛星観測機器の主要パラメータ	29
3.1	Crab パルサーの同時観測時期	33
3.2	Crab パルサーの Ephemeris	33
3.3	CALDB version list	34
3.4	ひとみ、Swift 衛星の基準時刻	34
3.5	各検出器での X 線イベント	36
4.1	各検出器の Peak 位置と電波放射との時刻ずれ	40
4.2	各検出器の時間分解能	42
5.1	畳み込みライトカーブの関数化条件	46
5.2	GRP 発生時の X 線増光率	55
5.3	X 線増光率の上限値	55
B.1	光電吸収モードのセレクション条件	68
C.1	各 Fitting 毎の電波時刻からのずれ	72
D.1	SXS	73
D.2	HXI (1 & 2, reg1)	74
D.3	SGD1 (photo-absorption)	75
D.4	XRT	76
D.5	BAT	77

第 1 章 序論

1.1 中性子星

中性子星とは、中性子を主成分とした超高密度天体 (コンパクトオブジェクト) である。そもそも、中性子は 1932 年に Chadwick によって発見されたが、そのわずか 2 年後の 1934 年に Baade、Zwicky は中性子が超高密度に集まった小半径で重力束縛の強い星、中性子星の存在を提案した [5]。また、彼らはそのエネルギーの見積もりから「中性子星は超新星爆発により形成される」と予想した [5]。その後も中性子星のモデルが数多く考案されたが、約 30 年後の 1967 年に Hewish らの観測により初めてパルサーが発見され [34]、1968 年に Gold が「パルサーは中性子星が回転している天体」という理論を提唱した [30]。これが中性子星パルサーの観測と研究の始まりである。

1.1.1 中性子星の形成

中性子星は、白色矮星やブラックホールなどの他のコンパクトオブジェクト同様、恒星の核燃料が尽きて亡くなるときに誕生する天体である。元の恒星の質量とその時形成されるコンパクトオブジェクトの種類を図 1.1 に示す。

恒星は星の中心部で行われる水素の核融合反応によって自信の重力を支えているが、核燃料を使い果たすとその重力を支えきれず急速に収縮が始まり、やがて白色矮星を形成する。白色矮星は電子の縮退圧により重力の収縮を抑えているが、天体の質量が大きすぎる場合はこの縮退圧だけでは支えきれず、白色矮星を形成できずにさらに収縮する。そのため、形成される白色矮星には限界質量があり、これを Chandrasekhar Limit と呼ぶ [16]。元の恒星の質量が $8 M_{\odot}$ 以上の場合、形成される白色矮星は Chandrasekhar Limit ($\sim 1.4 M_{\odot}$) を超えるため、この縮退圧だけでは支えきれずさらに収縮する。その後、陽子 (p) は電子 (e^-) と一体となり中性子 (n) として存在する方が安定する領域に達し、式 1.1 のように逆 β 崩壊が進む。

$$p + e^- \rightarrow n + \nu_e \quad \nu_e: \text{ニュートリノ} \quad (1.1)$$

逆 β 崩壊により、中心核は中性子過剰核で満たされるとともに電子が捕獲されるため、電子の縮退圧はさらに弱まる。これにより星全体は重力崩壊し、超新星爆発が起こる。星の大部分は爆発の影響で吹き飛ばされるが、中性子で満たされた中心核は吹き飛ばずに残り、これが中性子星となる。

1.1.2 中性子星の質量と半径

一般的な中性子星は、太陽程度の質量を持ちながら半径が約 10 km 程度の超高密度な天体である。中性子星では中性子の縮退圧によって自身の重力を支えているため、重力と縮退圧のバランスのとれた大きさ (半径) に落ち着く。しかし、星の中心部は中性子の密度が濃いため、中性子星の大きさを考慮する上では中性子同士の核力が重要になってくる。図 1.2 は各核力 (状態方程式) のモデルにおける中性子星質量と半径の関係を示す。ここで、図 1.2 において各モデルの質量最大値は中性子星質量の上限値で

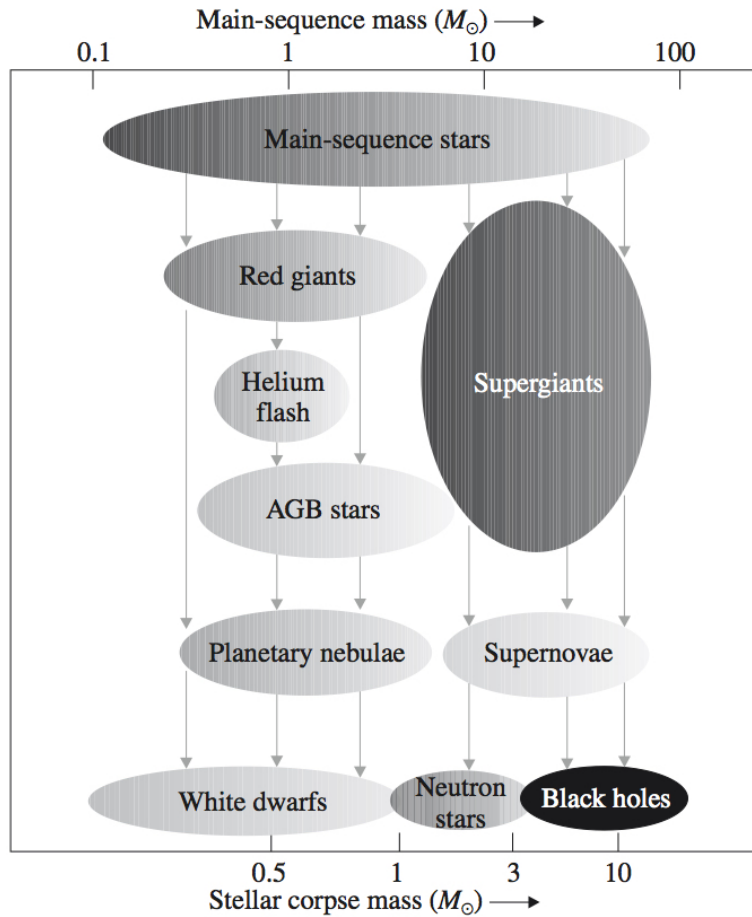


図 1.1: 恒星質量とコンパクトオブジェクトへの進化過程の関係。元となる恒星質量が約 $0.1 \sim 0.8 M_{\odot}$ の場合、赤色巨星 → 惑星状星雲を経て白色矮星となるが、約 $8 M_{\odot}$ 以上になると重力崩壊による超新星爆発がおり、中性子星やブラックホールを形成する [15]

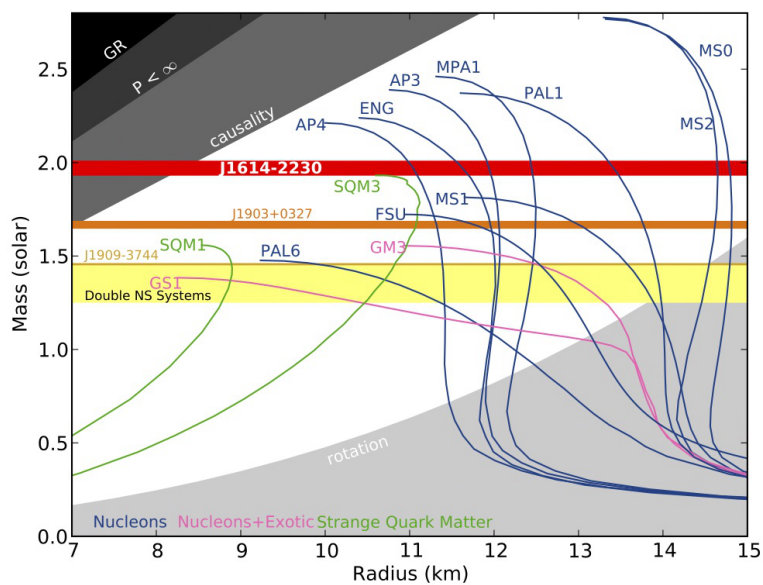


図 1.2: 各モデルに対する中性子星質量と半径の関係。水平の線は実際の観測で得られた中性子星質量の制限範囲 (Model: [55], Figure: [23])

あり、この位置より半径が大きい右側の領域は、中性子星として安定な領域となる。逆に、半径の小さい左側の領域は、一般相対論的效果により不安定となり中性子星としては存在できず、重力崩壊によりブラックホールとなる。

中性子星の質量と半径の比は、連星系でのケプラーの第三法則 ([79]: 9.4 節) などを用いて高い精度で求めることができる。また、質量の測定法として、中性子星表面で起こる X 線バーストとエディントン限界光度の関係から求める方法 ([56]: 4 章) などが挙げられるが、天体までの距離など様々な不定性が多いのが現状である。ゆえに、観測的に質量と半径を独立に計測することは系統誤差が大きい。

1.1.3 中性子星の内部構造

中性子星の内部は、図 1.3 のように、表面層である Envelope から中心核の Inner Core まで複数の層に分かれていると理論で予測されている。

(1) Envelope

中性子星の表面層。密度は 10^9 kg m^{-3} 以下で、温度や磁場による影響で固体または液体状態になっている。

(2) Outer Crust

Envelope のすぐ下の領域。密度は $10^9 \sim 4.3 \times 10^{14} \text{ kg m}^{-3}$ で、鉄やニッケルなどの原子核が規則的に並んでいる固体の領域である。密度が $10^{10} \text{ kg m}^{-3}$ を越えた領域になると、式 1.1 のような電子捕獲の反応が増え、中性子過剰核が増える。さらに密度が濃い領域では、重たい原子核が β 崩壊せずに存在している。

(3) Inner Crust

Outer Crust よりも内側の領域。密度は $4.3 \times 10^{14} \sim 1 \times 10^{17} \text{ kg m}^{-3}$ で、Outer Crust 同様中性子過剰核が並んで存在している。また、この領域になると原子核が中性子を束縛しておくことができず、超流動状態の中性子ガスが存在している。

(4) Outer Core

Inner Crust よりもさらに内側の領域。原子核は全て溶け出し、主に超流動状態の中性子から構成されている領域。この領域では超流動の中性子の他にも陽子や電子などの荷電粒子もわずかながらに存在している。陽子に関しては中性子と同様に超流動状態となっている。

(5) Inner Core

中性子星の中心領域。密度が極めて高いため、凝縮した π 中間子、K 中間子や、ハイペロン、クォークなどの素粒子が存在する領域と言われているが、未だ謎が多い領域。中心領域で中間子や素粒子などが形成されていれば、ニュートリノの放射率が増え、結果的に星の表面温度下がるため、中性子星表面温度の観測が内部構造を知る手掛かりとなり得る。

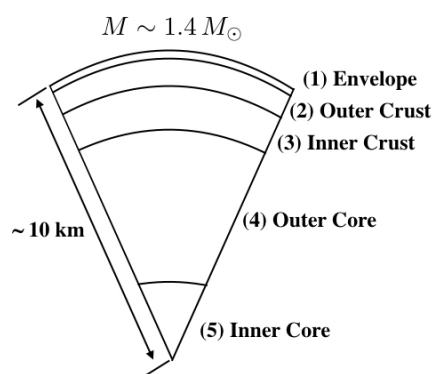


図 1.3: 中性子星内部の断面図。質量: 約 $1.4 M_{\odot}$ 、半径: 約 10 km 程度の中性子星の場合を仮定している。([73], [79]: Fig 9.4 改)

1.2 パルサー

パルサーとは、パルス状の電磁放射を規則的に行う天体の総称で、電波から X 線、 γ 線まで様々な波長域で観測されている。そもそもの発見は 1.1 節 で述べたように、1967 年に Hewish が率いるグループが天体からの周期的な電波パルスを観測したのが始まりで、1968 年に Gold によって「パルサーは回転している中性子星」という理論が提唱された。これまでに観測されたパルサーは、2000 個以上にもなる。

1.2.1 パルサーの周期と磁場

パルサーは秒速レベルで高速回転をしており、また星の表面で強い磁場を持っているのが特徴である。この高速な回転周期の所以は、元の恒星が持っていた角運動量が保存されるので、中性子星のサイズに収縮した分だけ自転周期が短くなるからだと考えられている。強磁場についても、元の恒星の磁束保存を適用すると同様なことが言えるが、中性子の強相関物性なども考慮した議論が必要である。

これまで観測されたパルサーの自転周期 P と、自転周期の時間微分 $\dot{P}$ をプロットした、 P - $\dot{P}$ diagram を図 1.4 に示す。パルサーの自転周期は、最も短い周期の 1.56 msec (PSR B1937+21 [7]) から始まり、長い周期のものは 8.51 sec (J2144-3933 [93]) のパルサーも確認されている。また、これらのパルサーはどれも時計のように極めて精度が良く、自転周期を 13 桁程度まで正確に測れるパルサーも存在する。このパルス周期は中性子星の自転周期と結びつきがあるが、周期は時間の経過とともにわずかながらに延びていることが観測により分かっており、パルサーの自転周期 P の時間微分 $\dot{P}$ [s/s] で定義される。 $\dot{P}$ はどの天体においても安定的で、例えば電波パルサーでは約 $\dot{P} \sim 10^{-15}$ s/s 程度である。つまり、パルサーの年齢 τ は、 $\tau \equiv P/2\dot{P} \sim 10^7$ 年よりも若いことになる。また、周期の短いパルサーではこの $\dot{P}$ が大きくなり、さらに星の年齢が若くなる傾向がある。

上記で述べたパルサーのスピンダウンは、パルサーの回転エネルギーを磁気双極子として消費しているため起こるとされる。このとき、パルサーを簡単な磁気双極子放射モデルと仮定すると、パルサーの慣性モーメントを I として、パルサーの回転によるエネルギー損失率 (Spin-Down Luminosity: $-\frac{4\pi^2 I \dot{P}}{P^3}$) やおよそその年齢 (特徴年齢: Characteristic Age $P/2\dot{P}$)、表面磁場の下限値を求めることができる (付録 A 参照)。また、図 1.4 の P - $\dot{P}$ diagram では磁気双極子放射を仮定して、 P - $\dot{P}$ から Spin-Down Luminosity・特徴年齢・磁場の目安の線を引くことができる。

パルサーの周期は少しずつ延びていくが、突発的なスピナップ現象の Glitch が観測されることがある。図 1.5 は Vela パルサー (PSR J0835-4510) での実際の観測例だが、ある期間に巨大な Glitch が 4 度起こり、スピナップした後に約 50 日間かけて元の周期へ戻った。Glitch は Vela パルサーで 1969 年に初めて見つかри、以降その他のパルサーでも度々観測されている。Glitch の発生原因については、中性子星内部が超流動状態 (1.1.3 節 参照) のため星の内部と表面の歳差運動が起こり、内部から外部へ角運動量の輸送でスピナップしていると考えられているが、未だはっきりとした結論は得られていない。

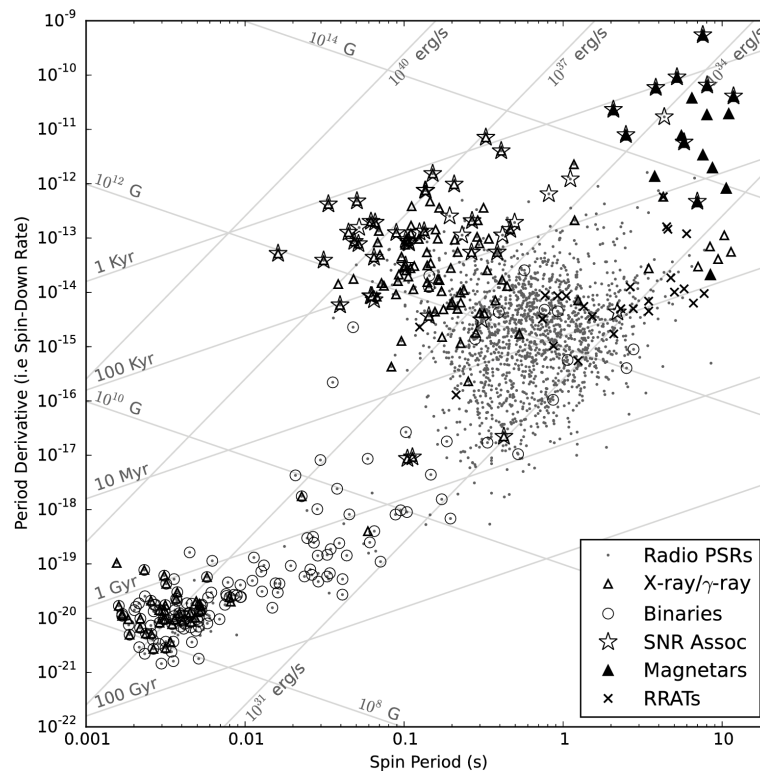


図 1.4: $P-\dot{P}$ diagram. “.”: 電波パルサー、“ Δ ”: X 線・ γ 線で放射、“ $\bigcirc$ ”: 連星系、“ $\star$ ”: 超新星残骸が付随、“ $\blacktriangle$ ”: マグネター、“ $\times$ ”: Rotating Radio Transients [20]

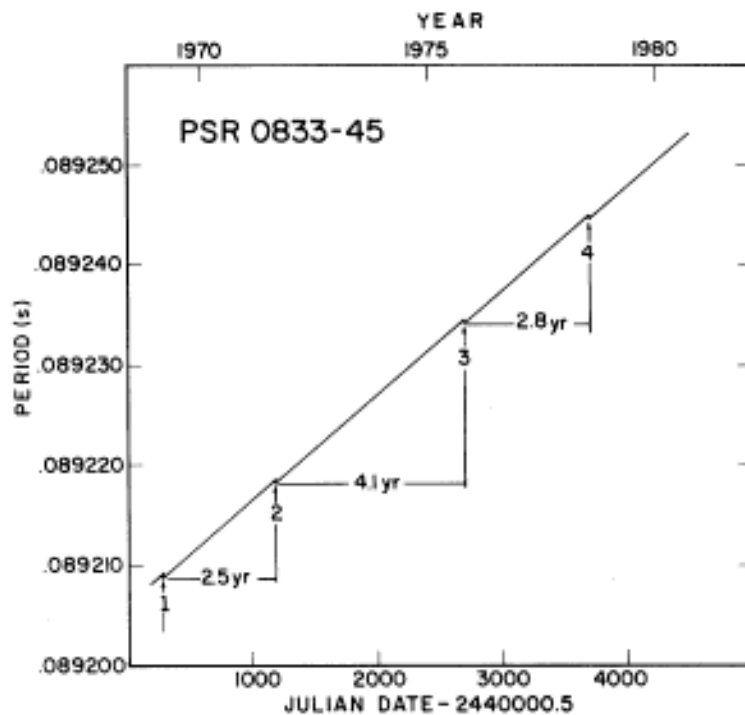


図 1.5: Glitch の観測例。Vela パルサーで 1968 年後期から 1980 年中期までで 4 回のスピニアップが数年おきに観測された [24]

1.2.2 パルサー磁気圏からの電磁放射機構

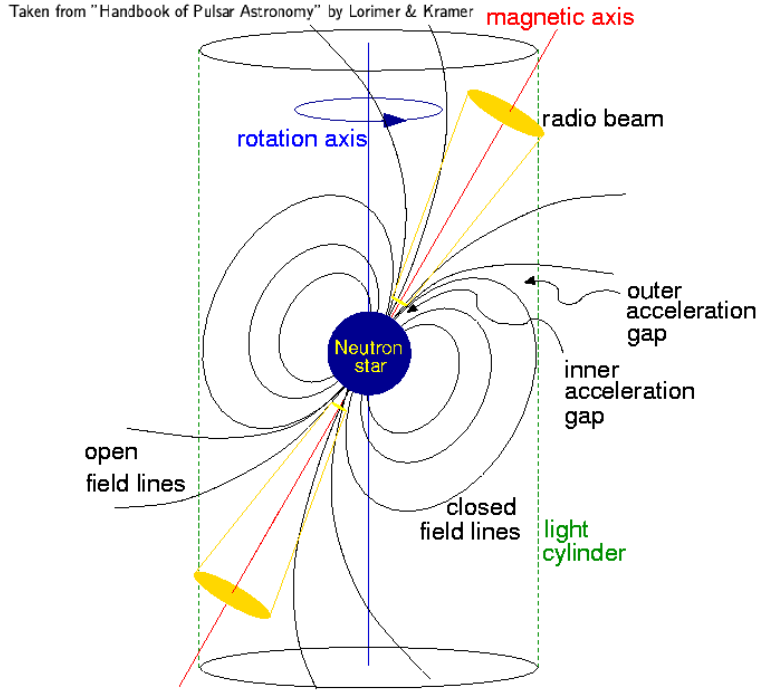


図 1.6: パルサーの放射領域 [57]

パルサーは磁場を持ちながら高速回転しているため、ローレンツ力により単極誘導を起こす。このとき生じる誘導起電力 (10^{16-18} V) により、荷電粒子が磁力線に沿って加速されることで電磁放射を起こしている。多くの荷電粒子は集団となって移動することでビーム状の電磁放射になり、パルサーの回転軸と磁軸が異なるときに、パルサーが回転して磁軸が観測者の方向を向く度にこのビームがパルスとして観測され则认为られている。

荷電粒子が加速される領域は、内部加速領域 (inner acceleration gap) と外部加速領域 (outer acceleration gap) があるとされ (図 1.6)、古典的には、内部加速領域では Polar Cap モデル [77]、外部加速領域では Outer Gap モデル [17] (または Slot Gap モデル [4]) と呼ばれる放射モデルが考えられている。パルサーにおける電波帯域の放射は、主に内部加速領域の磁力線で細く絞られたビーム状の放射とされ、一方で可視光や X 線、 γ 線などの高エネルギー放射は、外部加速領域での荷電粒子の運動による曲率放射 (Curvature Radiation) が有力であるが、完全な理解までには至っていない。

ここで、パルサーとその磁気圏が同じ角速度で自転していると仮定したとき、ある距離で磁気圏の回転速度が光速に達してしまう。この領域は Light Cylinder と呼ばれ、Light Cylinder の半径 R_{lc} はパルサーの角速度 Ω (周期 P) と光速 c を用いて式 1.2 のように書ける。

$$R_{lc} = c/\Omega = 2\pi Pc \quad (1.2)$$

Light Cylinder の外側では、磁気圏の回転速度が光速を越えられないため磁力線が開いてしまう。つまり、パルサーの磁気圏が存在するのは Light Cylinder の内側までとなり、外部加速領域もまた同様である。

1.2.3 パルサー風とパルサー星雲

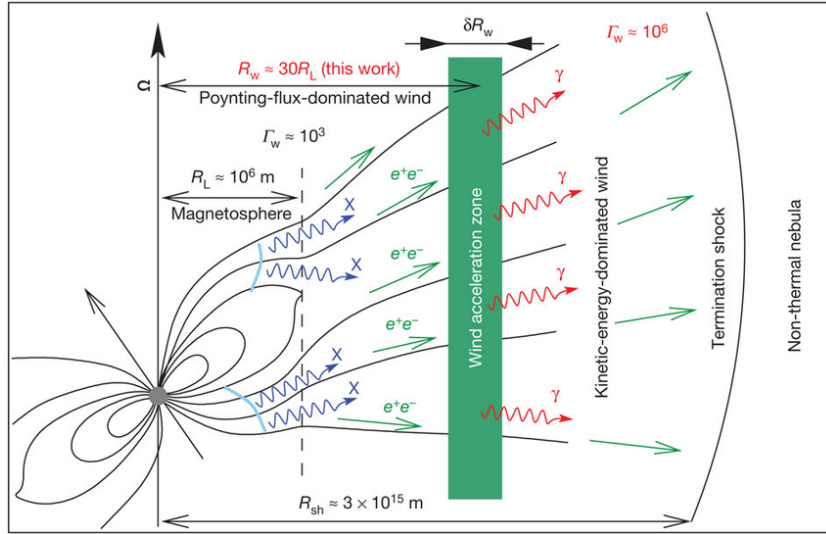


図 1.7: パルサー風とパルサー星雲の形成 [2]

1.2.2 節 で述べたように、荷電粒子の運動による曲率放射により γ 線が放射されるが、この γ 線が周囲の光や磁場と相互作用し、電子・陽電子を生成する。さらに、生成された電子・陽電子は単極誘導の誘導電流で加速し、磁力線に沿って運動することでまた γ 線が生成されるため、結果として雪崩的に電子と陽電子が増殖することになる。この電子と陽電子のプラズマは電磁流体加速をすることで、大きなエネルギーを有するプラズマ流を形成しパルサーから外側へと吹き出る。このプラズマ流はパルサー風と呼ばれ、磁気双極子放射同様回転エネルギーを放出しているため、パルサーの自転速度を減少させる要因の一つとされている。

パルサー風は、やがて超新星爆発によって吹き飛ばされた Ejecta のある領域まで達し、Ejecta と衝突することで衝撃波を形成する。このとき、Ejecta と衝突してできる衝撃波は Termination Shock と呼ばれる。衝撃波面近傍では、パルサー風の荷電粒子が相対論的速度まで加速され高エネルギーとなり、シンクロトロン放射 (Synchrotron Radiation) や逆コンプトン散乱 (Inverse Compton Scattering) などの非熱的放射により X 線や γ 線が多く放射され、パルサー風星雲と呼ばれる領域を形成する。

このように、パルサーの中には超新星残骸との間にパルサー風やパルサー風星雲の階層構造が見られるものもある。この構造はしばしばプレリオン (Plerion) とも呼ばれる。プレリオンの模式図を図 1.7 に示す。

1.2.4 パルサーの分類と多様性

パルサーの多くは中性子星であるが、その成り立ちから連星系を組んでいるものや超新星残骸を伴うものなど多種多様に存在する。そのため、1.2.2 節 で述べたような電磁放射以外にも、伴星からの質量降着による放射や黒体放射を仮定した中性子星表面の熱的な放射など、パルサーからの放射も天体の特徴により様々である。ここで、パルサーの放射エネルギー源から表 1.1 のような大まかな分類ができる。

表 1.1: 放射エネルギー源によるパルサーの分類

	放射エネルギー源	例
回転駆動型パルサー	回転エネルギー	孤立系電波パルサー
降着駆動型パルサー	重力による質量降着	HMXBs, LMXBs ^{*a}
磁気駆動型パルサー (マグネター)	強磁場	SGR, AXP ^{*b}

^{*a} High Mass X-ray Binaries, Low Mass X-ray Binaries

^{*b} Soft Gamma-ray Repeater, Anomalous X-ray Pulsar

表 1.1 のうち、特に回転駆動型パルサーとマグネターには多様な種類が存在する。この多様性を理解する際に、図 1.4 の $P-\dot{P}$ diagram がよく用いられる。図 1.4 より、多くのパルサーは P が 0.1 sec ~ 1 sec の間に分布しているが、この分布から大きく離れたものや変わった特徴を示すものを以下に示す。

(1) ミリ秒パルサー

超高速回転しているパルサーで、 $P-\dot{P}$ diagram では左下に位置している。図 1.4 より、ミリ秒パルサーの磁場は約 10^8 Gauss 程度でパルサーの中でも比較的弱く、また $\dot{P}$ も $10^{-20} \sim 10^{-22}$ s/s ととても小さいため、スピンドウン時間は非常に長く高齢な天体も多いのが特徴である。ミリ秒パルサーのほとんどは連星系を組んでいることから、伴星からの質量降着により角運動量が注入され高速な自転周期になっていると考えられており、古い単独の電波パルサーが伴星を捕まえて連星系となり、スピニアップすることで高速回転が実現しているという説がある (パルサーのリサイクルシナリオ [10])。

(2) マグネター

パルサーの中でも 10^{14} Gauss 程の強磁場をもつ種類で、 $P-\dot{P}$ diagram では右上に位置している。マグネターは X 線や γ 線で非常に明るい、自転周期が大変遅く、通常のパルサーのスピンドウン光度ではその明るい放射を説明できない。また、 $P-\dot{P}$ diagram で予想される磁場は臨界磁場 (4.4×10^{13} Gauss) を超えており、稀にバースト活動も観測されていることから、パルスの放射源は回転エネルギーではなく強磁場由来のものだと考えられている。1992 年に Duncan と Thompson によりマグネターの理論 [25] が提唱されたが、現在のマグネター候補天体としては、ランダムな周期で爆発的な放射をする Soft Gamma Repeater (SGR) や、定常的に熱的な X 線で輝く Anomalous X-ray Pulsar (AXP) が挙げられる。

(3) Rotating Radio Transients (RRATs)

絶え間なくパルスが見える通常のパルサーとは異なり、不規則に明滅を繰り返す天体。2006 年に McLaughlin らによって発見 [63] されて以降、100 個以上の RRATs が見つまっている。 $P-\dot{P}$ diagram では右側に位置しているので周期が比較的長いのが特徴であるが、形成過程など未解明の部分が多い天体である。

これらの他にも、数ヶ月以上の間隔でしか光らない Intermittent Pulsar [49] や、たまにパルスが無い Pulse Nulling [6] を起こす特殊なパルサーも観測されており、連星系の質量降着での放射で伴星を蒸発させてしまう Black Widow Pulsar [28] などの種類も見つまっている。さらに、超新星残骸中の Central Compact Object (CCO) [94] や、孤立中性子星の X-ray Dim Isolated Neutron Stars (XDINS) [21] など、熱的な X 線源からの周期的なパルスの観測例もある。

1.3 Giant Radio Pulse

Giant Radio Pulse (GRP) とは、パルサーからの定常パルスの中に不規則に混じる巨大な電波放射のことである。GRP の厳密な定義がなされていないが、一般的に非常に短い時間で電波の放射エネルギー (flux [$\text{W}/\text{m}^2/\text{Hz}$]) が通常のパルスよりも 100 ~ 1000 倍以上に上昇するパルスを指す。(図 1.8) GRP の発生頻度も様々で、連続の自転周期で発生する場合もあれば、発生頻度が非常に少ない天体もある [60]。また、GRP は単一のパルス放射とは限らず、非常に短い時間で変動する GRP も確認されている [31]。このように、GRP は特異で様々な状態が確認されているため、その放射機構は謎に包まれている。

GRP はパルサーが初めて発見されてすぐの 1968 年から観測されているが [83] [82]、GRP が観測されるのは全パルサーのうち 1% にも満たない。これまで GRP が観測されている主な天体を表 1.2 に示す。GRP の研究が進んでいる主なパルサーは、典型的な回転駆動型パルサーの PSR B0531+21 (Crab) とミリ秒パルサーの PSR B1937+21 などが挙げられる。近年では GRP が観測される電波帯域だけでなく、可視光や X 線、 γ 線の帯域との関係性を見るための同時観測も増えてきている。

表 1.2: Giant Radio Pulse の観測された主な天体

天体名	Reference	備考
PSR B0531+21 (Crab)	[83]	GRP 初観測天体
PSR B1937+21	[19]	ミリ秒パルサー
PSR B1821-24	[76]	ミリ秒パルサー
PSR B1112+50	[26]	非強磁場
PSR B0540-69	[42]	LMC 内パルサー ^{*a}
PSR B0031-07	[53]	非強磁場
PSR J0218+42	[43]	ミリ秒パルサー
PSR B1957+20	[43]	ミリ秒パルサー
PSR J1752+2359	[27]	非強磁場
PSR J1823-3021A	[46]	ミリ秒パルサー
PSR B0656+14	[52]	非強磁場
PSR B0950+08	[81]	
PSR B1133+16	[44]	

^{*a} Large Magellanic Cloud: 大マゼラン雲

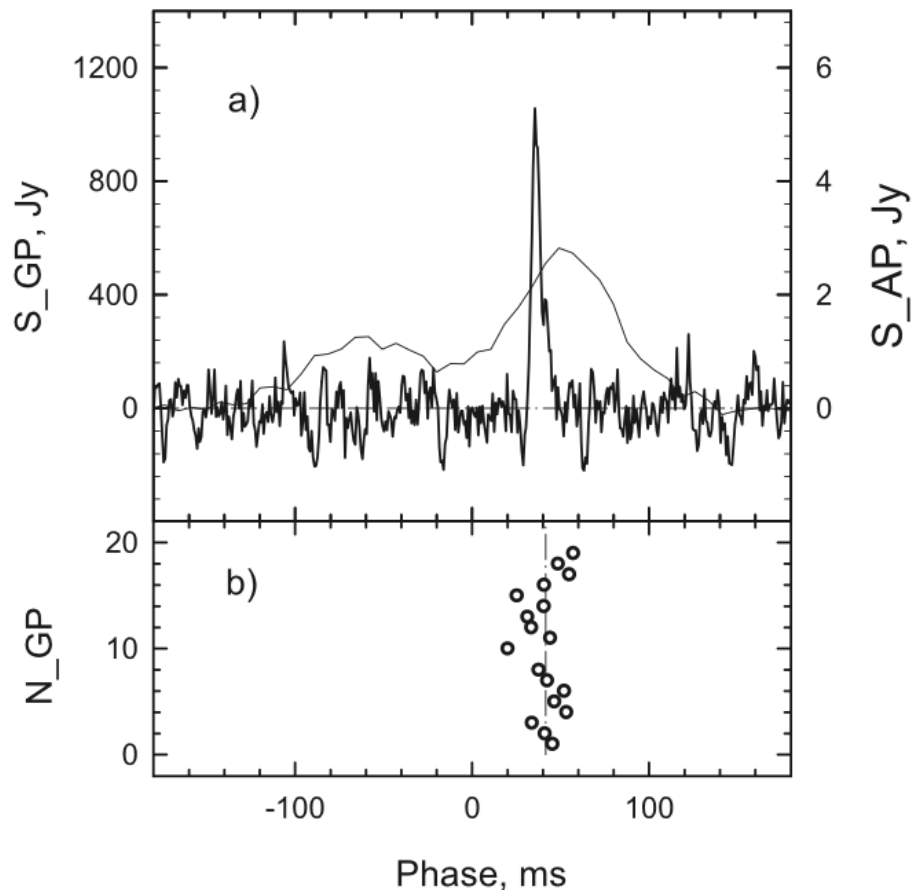


図 1.8: Giant Radio Pulse の観測例。PSR B1937+21 の 1650 MHz 帯で観測された GRP (実線: 左縦軸) と平均パルス (破線: 右縦軸) の強度を示しているが、GRP が桁違いな強度を持っていることがわかる。[51]

1.4 Crab パルサー



図 1.9: 可視光 (赤) と X 線 (青) で撮像した Crab パルサーの合成画像 ([33]; http://hubblesite.org/image/1248/news_release/2002-24, 2002)

Crab パルサー (PSR B0531+21) は、地球から約 7,000 光年の距離にあるかに星雲 (Crab nebula: NGC 1952) 中で確認されているパルサーである。かに星雲は 1928 年に Hubble により、1054 年に日本を含め世界各地で観測された超新星爆発 (SN 1054) でできた超新星残骸であると結論付けられた [38]。その後、1968 年後期に David と Edward がかに星雲中からの 2 つの電波パルス放射源を観測し [83]、Crab パルサーとして初めて発見された。Crab パルサーは、初めて超新星残骸と中性子星が関連付けられた観測例でもある [83]。X 線と可視光で撮像した Crab パルサーの可視光と X 線観測の合成画像を図 1.9 に示す。

1.4.1 Crab パルサーの特徴

Crab パルサーは、約 33 msec で自転している典型的な単星の回転駆動型パルサーであり、電波から X 線、 γ 線までの幅広い波長域で放射されている。自転周期は約 10^8 sec のオーダーで遅くなっており、図 1.4 の $P-\dot{P}$ diagram 上では左上に位置する。パルスの放射源は自転による回転エネルギーとされ、磁気双極子放射のモデル (付録 A) を仮定したときのスピンドウン光度は、これまで観測されているパルサーの中でも最大級である。

かに星雲と Crab パルサーからの放射スペクトルを、図 1.10 に示す。図 1.10 より、Crab パルサーは X 線帯域 ($10^2 \sim 10^6$ eV) で特に明るく放射されているため、自転周期の安定性を利用して X 線観測の時刻較正などに利用されることも多い。また、Crab パルサー周囲にある、パルサー風星雲の X 線帯域での明るさ ($2.4 \times 10^8 \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ @ 2 - 10 keV) を基準として、X 線天文学では Flux 密度をしばしば "crab"、"millicrab" などの単位系で表すことがある。

図 1.11 に各波長域における Crab パルサーからの Pulse Profile を示す。Crab パルサーのパルス放射は、図 1.11 のように 2 つのパルスがあるのが特徴で、1.0 phase 付近のものは Main Pulse、1.4 phase 付近のものは Inter Pulse と呼ばれる。これらの Main, Inter Pulse は、パルサーの異なる磁極から生

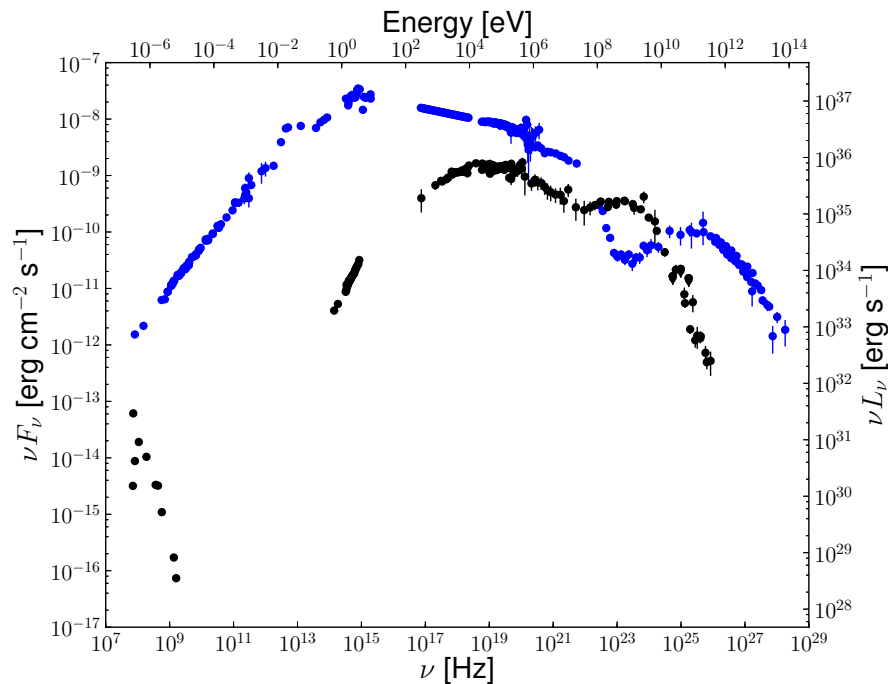


図 1.10: かに星雲 (Crab Nebula) と Crab パルサーの Wide Band Spectrum。青: かに星雲、黒: Crab パルサー。横軸は各波長域の周波数 ν とエネルギー、縦軸は単位周波数 (エネルギー) あたりの flux: νF_ν と Luminosity: νL_ν を示している。[13]

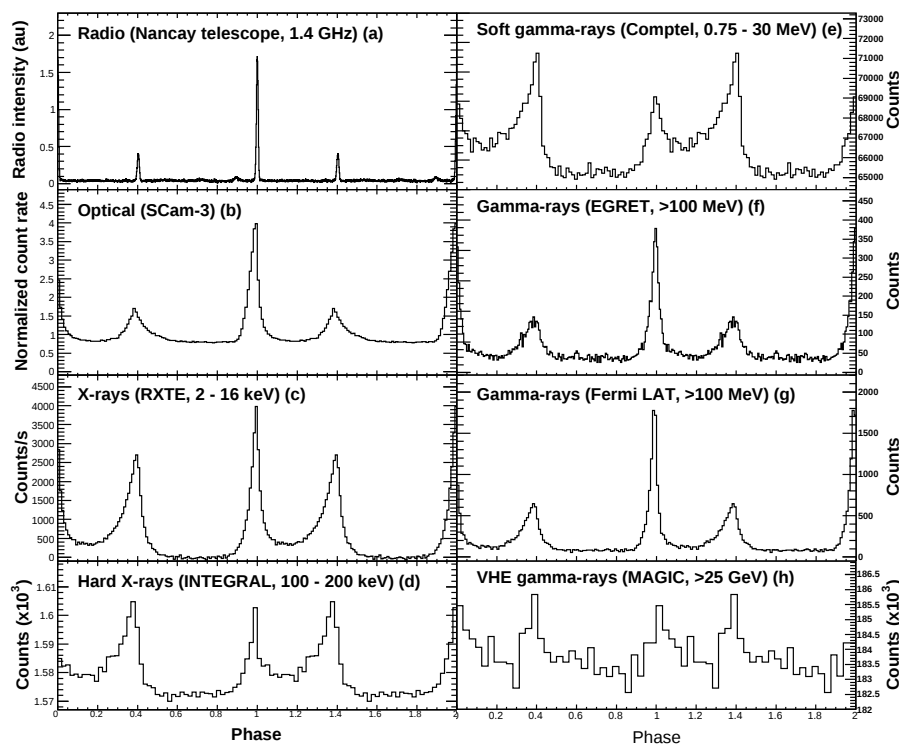


図 1.11: Crab パルサーの Wide Band Pulse Profile。横軸はパルサーの 1 周期 = 約 33 msec の位相としている。(a) Radio, (b) Optical, (c) X-rays, (d) Hard X-rays, (e) Soft γ -rays, (f) γ -rays, (g) γ -rays, (h) VHE (Very High Energy) γ -rays [1]

成され则认为られている [61]。また、図 1.11 から分かつるとおり、X 線 - 軟 γ 線帯域 ((c) - (e)) では Main Pulse と Inter Pulse の強度比が変化しており、高エネルギー側ほど Inter Pulse が強くなっていることがわかる。これに関連して、Massaro et al. (2006) [62] や Jain & Paul (2011) [41] では、Main と Inter Pulse の強度比にエネルギー依存性があることが示唆されている。

1.4.2 Crab パルサーでの Giant Radio Pulse

Crab パルサーは GRP が初めて観測された天体で、1968 年後期に David と Edward が Crab パルサーを発見した当初から GRP が観測されている [83]。それ以降、Crab パルサーでは GRP が多く観測されているため、GRP の研究が最も盛んに行われているパルサーである。

これまで Crab パルサーで観測された GRP では、円偏光を伴いつつ nsec オーダーで細かく変動する GRP が観測されている [31]。GRP の放射強度の分布はべき型 (power-law、べき: 約 -2.4) の形になり、通常のパルスに比べ GRP の強度が大きくなればなるほど数は少なくなることが分かっている [9] [74]。特に Popov et al. (2009) [74] では、この放射強度の分布が Main と Inter Pulse で異なるべきを持つことが確認されている。GRP の変動時間もべき型の分布を持つことが分かっており、変動時間が長くなればなるほど数は少ない [9] [74]。GRP のスペクトル形状もべき型の傾向があり、高周波帯の放射ほどハードなスペクトルとなることが分かっている [74]。つまり、Crab パルサーの GRP は低周波帯 (MHz ~ GHz) で観測しやすい。

近年では、Crab パルサーが他波長でも明るいことを利用し、GRP が発生する電波帯域とその他の波長域での同時観測が行われており、GRP と他波長域の放射との関連性についても研究されている。これまでに GRP と同時観測を行った、他波長の検出器での観測結果を表 1.3 に示す。可視光帯域では、GRP 発生時の Main Pulse が Shearer et al. (2003) [80] では + 3 %、Strader et al. (2013) [84] では + 11.3 % 増光していることが確認されている。対して X 線 - γ 線帯域では、GRP と同期した有意な増光が見えないものが多く、増光の上限値のみの導出で留まっている。これは、完全な同時観測が難しく、また観測の統計的不定性が大きいことも由来している。特に X 線帯域の放射では、GRP とは独立のタイミングで、X 線パルスが増光する Giant X-ray pulse のようなものは発見されていない [72][91]。

表 1.3: 電波望遠鏡と同時観測した Crab パルサーの Giant Radio Pulse 一覧

観測機器	エネルギー	MP-GRP	IP-GRP	Reference
WHT ^{*a}	1.7 - 2.0 [μeV] (Optical)	+ 3 % (7.8 σ)	< 2.5 % (1 σ)	[80]
ARCONS/HT ^{*b}	1.1 - 3.1 [μeV] (Optical)	+ 11.3 % (3.3 σ)	—	[84]
Chandra	1.5 - 4.5 [keV] (Soft X-ray)	< 10 % (2 σ)	< 30 % (2 σ)	[12]
HXD/すざく	15 - 75 [keV] (Hard X-ray)	+ 21.5 % (2.7 σ)	—	[64]
SXS/ひとみ	2 - 10 [keV] (Soft X-ray)	< 90 % (3 σ)	< 180 % (3 σ)	[36]
HXI/ひとみ	5 - 80 [keV] (Hard X-ray)	< 40 % (3 σ)	< 200 % (3 σ)	[36]
SGD/ひとみ	10 - 300 [keV] (Soft γ -ray)	< 200 % (3 σ)	< 1100 % (3 σ)	[36]
ALL/ひとみ	2 - 300 [keV]	< 25 % (3 σ)	< 110 % (3 σ)	[36]
OSSE/CGRO ^{*c}	50 - 220 [keV] (Soft γ -ray)	< 250 %) ^{*d} (1 σ)		[58]
EGRET/CGRO	0.05 - 30 [GeV] (γ -ray)	< 460 % (3 σ)	—	[75]
LAT/Fermi	0.1 - 5 [GeV] (γ -ray)	< 400 % (2 σ)	< 1200 % (2 σ)	[11]
VERITAS ^{*e}	> 150 [GeV] (VHE ^{*f} γ -ray)	—	< 500 - 1000 % (2 σ)	[3]

^{*a} William Herschel Telescope^{*b} Hale telescope^{*c} Compton Gamma Ray Observatory^{*d} MP, IP の区別無し^{*e} Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System^{*f} Very High Energy

1.5 本論文の目的

1.4 節 で述べたように、Crab パルサーは理想的な回転駆動型パルサーで、その Spin Down Luminosity はパルサーの中でも最大級を誇り、加えて多波長域で明るく光っているため観測しやすい。そのため、周期や明るさなどの典型的なパラメータも求めやすく、観測機器の時刻較正や感度指標によく用いられている。また、Crab パルサーからの Main Pulse と Inter Pulse は、パルサーの異なる磁極から放射されると考えられているが、どの周期においても 2 つの放射の位相は多波長で揃っている。しかし、発見されてから 50 年近く経過した今でも、Main Pulse、Inter Pulse 共々、そのパルスの放射機構は完全に解明されていない。特に Jain & Paul (2011) [41] では、X 線帯域でそれぞれのパルスの強度バランスがエネルギー依存性をもつことが示唆されているが、詳細な理解には至っていない。また Crab パルサーでは、ごく一部のパルサーでしか見られない GRP も多く観測されており、通常のパルス放射だけではなく、GRP という瞬発的な磁気圏活動もさらなる謎を呼んでいる。近年では、Crab パルサーが多波長で明るいことを利用し、X 線を始めとした電波以外の帯域と GRP を同時観測することで、GRP 発生時の放射を理解しようとする試みがある。このように、Crab パルサー は長年観測されているが、そのパルス放射は完全な理解には至っていない。特に X 線帯域観測は、較正用天体としてだけでなく、その未解明な放射を理解する上でも重要である。

2016 年度に打ち上げられた X 線天文衛星「ひとみ」は、打ち上げ後の時刻較正を目的として、搭載されている全検出器で Crab パルサーを観測した。「ひとみ」衛星は、GPS 衛星との通信による時刻較正システムと SpaceWire を利用した時刻配信システムを搭載し、X 線到来の絶対時刻精度が $35 \mu\text{sec}$ 以内を目標に設計された。この目標値は、打ち上げ前の地上試験で達成されている [89]。今回の Crab パルサーの観測では、地上の低周波帯電波望遠鏡の他に、「ひとみ」とほぼ同エネルギー帯域を感度を持つ Swift 衛星とも同時観測を行った。

本研究では、Crab パルサーの X 線と電波帯域の同時観測結果を用いて、(1) 軌道上における「ひとみ」衛星の X 線観測の絶対時刻精度及びパルス検出性能の評価と、(2) Crab パルサーの X 線パルス放射特性の理解を目的とする。特に (2) では、Main Pulse と Inter Pulse の強度比のエネルギー依存性と、X 線帯域における GRP 放射に注目する。

第 2 章 X 線観測機器

2.1 X 線天文衛星「ひとみ」

「ひとみ」(ASTRO-H) [87] 衛星は、2016 年 2 月 17 日に日本から打ち上げられた X 線天文衛星である。(図 2.1) これまで日本で開発された X 線天文衛星としては「すざく [66]」に次いで 6 番目の衛星であり、全長 14 m、重量 2.7 t と日本の打ち上げてきた天文衛星では最大規模の大きさである。ひとみ衛星には、Soft X-ray Telescope (SXT) と Hard X-ray Telescope (HXT) の 2 つの望遠鏡と、Soft X-ray Spectromator (SXS)、Soft X-ray Imager (SXI)、Hard X-ray Imager (HXI)、Soft Gamma-ray Detector (SGD) の 4 つの検出器が搭載された。4 つの検出器の主要パラメータを表 2.1 に示す。

搭載機器の立ち上げ中の 2016 年 3 月末に通信が途絶する事故により 4 月に運用を終了したが、それまでに上記の 4 つの検出器を組み合わせることで軟 X 線 (0.2 keV) から軟 γ 線 (600 keV) まで広いエネルギー帯域の観測を行った。また、世界で初めて X 線マイクロカロリメータでの観測を行い、超高エネルギー分解能の分光観測を実現した。その結果、ペルセウス座銀河団中心部の高温ガスの静的な動きを発見 [35] するなど、6 天体の観測で Nature 誌 2 編を含む 13 本の査読科学論文と、36 本の検出器開発に関する査読論文など非常に大きな成果を残している。

以降では、本研究で使用した SXS、HXI、SGD の詳細を述べていく。

2.1.1 Soft X-ray Spectromator: SXS

Soft X-ray Spectromator (SXS) [67] は、0.2 - 12 keV の低エネルギー帯域に感度を持つ分光観測機器である。光子検出部 (図 2.2: (a)) には X 線マイクロカロリメータを用いており、これにより超精密分光観測を可能とした。マイクロカロリメータはすざく衛星で初めて搭載されたが、打ち上げ後の事故で使用することはできなかったため、世界で初めてマイクロカロリメータを用いて観測を行ったのはひとみ衛星の SXS である。

X 線マイクロカロリメータは、X 線光子の 1 つ 1 つを吸収体に入射させ、光電吸収によって上昇する素子の温度を測定し、間接的にエネルギーを求めている。このマイクロカロリメータの最大の特徴は、従来の検出器よりも統計揺らぎを抑えることで、超高エネルギー分解能を実現していることである。検出器の統計揺らぎはキャリア数に依存しているが、これまでの衛星に搭載された比例計数管や CCD など検出器では X 線入射時に電離した電子などをキャリアとして取り出しており、1 つの電子に対して約 20 eV の電離エネルギーが必要となる。それに対し、X 線マイクロカロリメータでフォノン 1 つが生成されるのに必要なエネルギーは数ミリ eV 以下と非常に小さく、従来の検出器よりも圧倒的に統計数が良くなる。このため、フォノンをキャリアとする X 線マイクロカロリメータのほうが他の検出器よりも統計揺らぎを抑えられ、エネルギー分解能がとて良くなる。

マイクロカロリメータの吸収体の温度変化は、数 mK と非常に小さく、また低温極限においてエネルギー分解能が温度に強く依存することなどから、マイクロカロリメータを極低温に維持することが不可欠になってくる。そこで、SXS では図 2.2: (c) のような Dewar 内にマイクロカロリメータを配置し、2 つの断熱消磁冷凍機と多層の断熱構造で、マイクロカロリメータを 50 mK という極低温度を維持でき

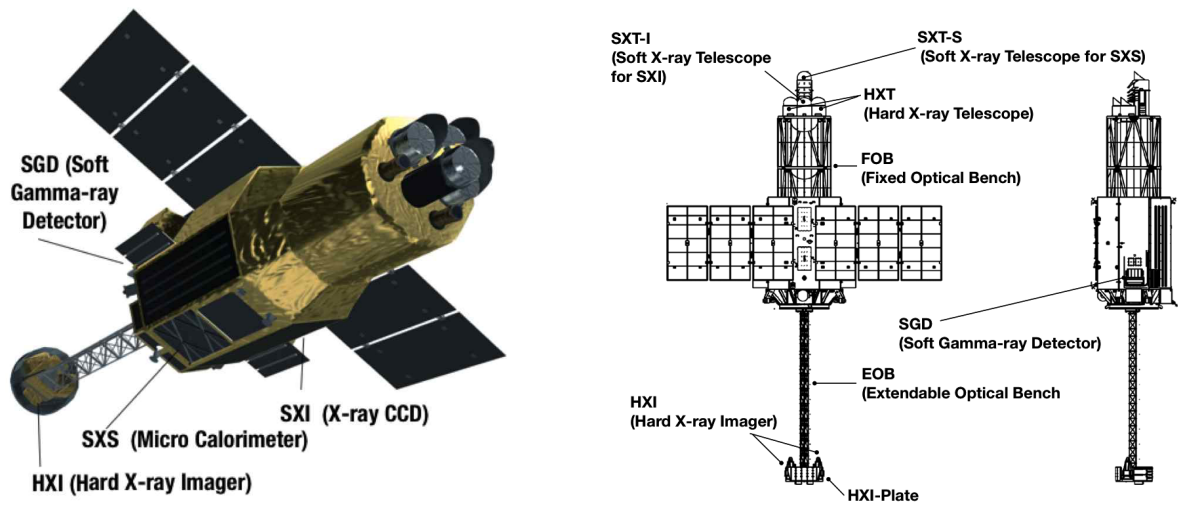


図 2.1: ひとみ (ASTRO-H) 衛星イメージ [86]

表 2.1: ひとみ (ASTRO-H) 衛星の主要パラメータ [87]

Parameter	Hard X-ray Imager (HXI)	Soft X-ray Spectrometer (SXS)	Soft X-ray Imager (SXI)	Soft γ -ray Detector (SGD)
Detector technology	Si/CdTe cross-strips	micro calorimeter	X-ray CCD	Si/CdTe Compton Camera
Focal length	12 m	5.6 m	5.6 m	–
Effective area	300 cm ² @ 30 keV	300 cm ² @ 6 keV 250 cm ² @ 1 keV	350 cm ² @ 6 keV 370 cm ² @ 1 keV	>20 cm ² @ 100 keV Compton Mode
Energy range	5 – 80 keV	0.3 – 12 keV	0.4 – 12 keV	40 – 600 keV
Energy resolution (FWHM)	2 keV (@ 60 keV)	< 7 eV (@ 6 keV)	< 200 eV (@ 6 keV)	< 4 keV (@ 60 keV)
Angular resolution	1.7 arcmin (@ 30 keV)	~ 1.2 arcmin	~ 1.3 arcmin	Non Imaging
Effective Field of View	~ 9 × 9 arcmin ²	~ 3 × 3 arcmin ²	~ 38 × 38 arcmin ²	0.6 × 0.6 deg ² (< 150 keV)
Time resolution	25.6 μ s	5 μ s	4 s/ 2 s/ 0.5 s/ 0.1 s	25.6 μ s
Operating temperature	–25°C	50 mK	–120°C	–20°C

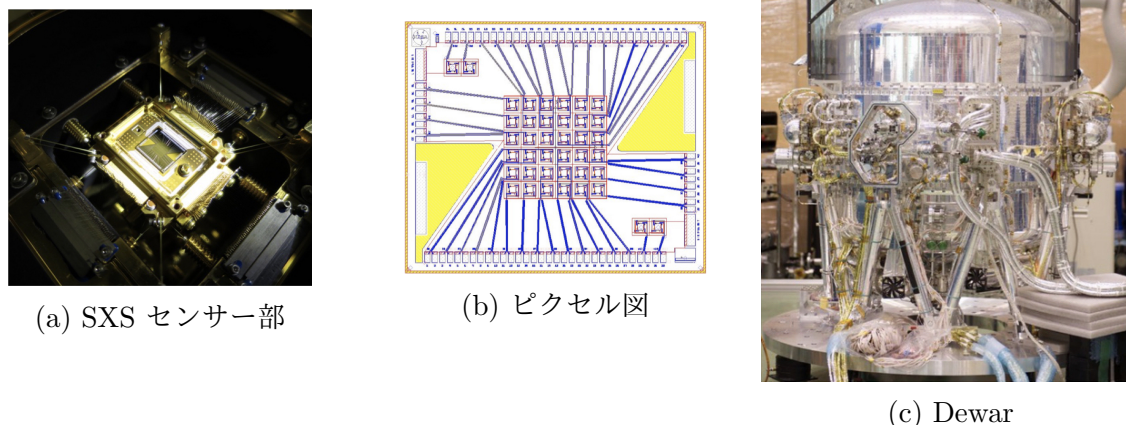


図 2.2: SXS センサー部 (a)、マイクロカロリメーターのピクセル図 (b)、Dewar (c) ((a),(c): [87], (b): [67])

る設計となっている。50 mK という低温下で、SXS 全体のエネルギー分解能が 7 eV 程度を満たすように設計されたが、衛星打ち上げ前の試験及び打ち上げ後の実際の観測で 5 eV という設計要求以上の感度を実現した [45]。

マイクロカロリメーターは図 2.2: (b) のように、一辺 $814 \mu\text{m}$ の正方形の素子が 6×6 のアレイ状に配置されており、それぞれが独立に光子を検出でき、検出イベント毎に時刻情報が付与される。36 ピクセルのうち、35 ピクセルは天体観測用に 5 mm 正方形領域内に配置され、残りの 1 ピクセルは較正用としてアレイの外側に配置され、較正線源が常に照射されている。また、吸収体は HgTe に Cd を注入した合金を使用しており、すざく衛星で用いられていた HgTe と比較して比熱が $1/4$ 程度に抑えられている。

2.1.2 Hard X-ray Imager: HXI

Hard X-ray Imager (HXI) [78] は、硬 X 線帯域の撮像と分光を目的とした検出器で、5 - 80 keV に感度を持つ。光子検出部は HXT の焦点面に置かれ、衛星の伸展時の焦点距離は 12 m となる。HXI は主検出部とそれを囲むアクティブシールドから構成される。ひとみ衛星には、HXI-1、HXI-2 として同型の検出器を 2 つ搭載している。

HXI の断面図を図 2.3 に示す。主検出部は、4 つの層からなる Double-sided Silicon Strip Detector (DSSD) と、1 つの層からなる CdTe Double-sided Strip Detector (CdTe-DSD) で構成される。DSSD は、1 枚あたりの厚さが 0.5 mm の Si 製半導体検出器で、30 keV 以下の軟 X 線を検出する。対して CdTe-DSD は、厚さ 0.75 mm の CdTe 製の半導体で、30 keV 以上の硬 X 線を検出する。このような積層構造により、広いエネルギー帯域で高感度な検出を可能としている。

半導体検出器では、入射した X 線が光電吸収、もしくはコンプトン散乱を起こし、半導体内に電子とホール (正孔) のペアが生成される。これらのペアは半導体内の電場に沿って電極まで移動し、このとき誘導電荷が生じるため、これを電荷信号として検出する。HXI に組み込まれている DSSD や CdTe-DSD のような Strip Detector は、ホールを引き寄せる p 型半導体と、電子を引き寄せる n 型半導体を垂直かつストリップ型に配列することで、入射粒子の反応位置を 2 次元的に得ることができる。また、2 次元のピクセル検出器であれば一つ一つのピクセル (N 列 $\times$ N 列) 毎に読み出す必要があるが、Strip Detector

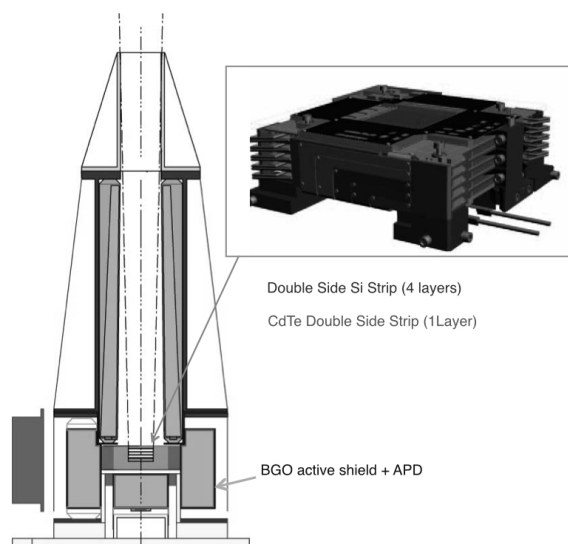


図 2.3: HXI 断面図 [48]

の場合は帯状半導体の数 (N 列 $\times$ 2) で済むので、高い位置分解能を維持しながら少ない読み出し口で済むのが特徴である。HXI の場合、読み出し口は $N = 128$ の計 256 個である。

主検出部の高感度を維持するためには、バックグラウンドを低くする必要がある。そこで HXI では、図 2.3 のように主検出部をアクティブシールドで囲っている。アクティブシールドには 9 個の BGO 結晶のシンチレータを用いており、すざく/HXD でも使用された [47]。BGO シンチレータは、比較的大きめの結晶まで作ることが可能なうえ、原子量が大きいので γ 線帯域まで阻止できる。主検出部は、井戸型に組まれた BGO シンチレータの底部に配置され、BGO と反同時計数をとることで宇宙線などのバックグラウンドを除外できる。すざく/HXD では光電子増倍管による読み出しを行っていたが、HXI ではアバランシェフォトダイオード (APD) で読み出しを行っている。APD は非常に小型の素子なので、BGO を隙間なく配置することができる。また、消費電力が低い点、打ち上げ時の振動に強い点など、光電子増倍管より様々な利点がある。軌道上の観測では、これまでの硬 X 線観測機器の中で一番低いバックグラウンドを実現しており、地上設計通りの感度を実現している [70]。

2.1.3 Soft Gamma-ray Detector: SGD

Soft Gamma-ray Detector (SGD) [85] は、軟 γ 線帯域の観測を目的とした検出器で、40 - 600 keV の広帯域に感度を持つ。SGD は検出部にコンプトンカメラを用いており、さらに検出部を HXI 同様のアクティブシールドで囲む設計となっている。集光系を持たないため撮像はできないが、同帯域のすざく/HXD よりも 10 倍以上の感度で軟 γ 線を検出できる。SGD はコンプトンカメラ 3 つを 1 列に並べる形で構成されており、ひとみ衛星には SGD-1、SGD-2 の 2 つの SGD が搭載された。

コンプトンカメラとは、 γ 線と電子との相互作用で生じるコンプトン散乱を利用し、光子のエネルギーと到来方向を求める検出器である。コンプトンカメラは主に散乱体と吸収体からなり、入射した γ 線が散乱体でコンプトン散乱を起こし、散乱後に吸収体で光電吸収される作りとなっている。通常、原子番号は小さく光電吸収よりもコンプトン散乱が起こりやすい物質を散乱体、原子番号が大きく光電吸収を起こしやすい物質を吸収体としている。まず、入射光子が散乱体でコンプトン散乱を起こしたとき、反跳電子は散乱体中で止まりエネルギー E_1 を失う。散乱前の電子の運動量を 0、静止質量エネルギーを m_e とすると、運動量保存則とエネルギー保存則より式 2.1 のように書ける。

$$E_1 = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2} (1 + \cos \theta)} \quad (2.1)$$

ここで、 E_γ は入射光子のエネルギー、 θ は光子の入射方向に対する散乱角である。その後、散乱光子は吸収体で光電吸収され、エネルギー E_2 を失う。このとき、式 2.1 より、散乱角 θ は式 2.2 のように書ける。

$$\cos \theta = 1 - m_e c^2 \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1 + E_2} \right) \quad (2.2)$$

従って、 $E_\gamma = E_1 + E_2$ で入射光子のエネルギーを求めることができる。また、散乱体、吸収体への入射位置ベクトルをそれぞれ $\mathbf{r}_1$ 、 $\mathbf{r}_2$ とすると、散乱前と散乱後の光子の進行方向を示すことができるので、入射光子の到来方向を $\mathbf{r} - \mathbf{r}_1$ とすると、式 2.3 で表されるような円錐上に制限することができる。

$$\cos \theta = \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_1|} \cdot \frac{\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|} \quad (2.3)$$

このとき、制限された円錐はコンプトンコーン (図 2.4) と呼ばれ、コンプトンコーンを用いて光子到来方向を求める手法をコンプトン再構成と呼ぶ。これがコンプトンカメラの基本原理である。

SGD でも上記のコンプトンカメラの原理を用いているが、それに加えてコンプトンカメラの視野をあえてアクティブシールドで絞ることで、コンプトン再構成の手法を撮像ではなく感度向上に用いているのが特徴である。SGD のコンプトンカメラでは図 2.5 のように、散乱体の Si と吸収体の CdTe の薄型半導体素子を高密度に積層した多層化構造となっている。SGD では、Si が厚さ 0.625 mm で 32 層に、CdTe が厚さ 0.75 mm で 8 層に積み重なっている。このような薄型の半導体によって厚さ方向の位置検出率が上がり、さらに、多層化することで薄くなった分落ちてしまった検出効率を補うことができるので、全体として高い検出効率となる。検出部となるコンプトンカメラは、HXI と同様に BGO 結晶でできた井戸型のアクティブシールドで囲まれ、カメラ上部は視野を制限するためのファインコリメータが取り付けられている。(図 2.5) SGD では、このアクティブシールドとファインコリメータを用いて視野を絞りつつ、コンプトン再構成を行うため、コンプトンコーンと視線方向が重ならないイベントを全てバックグラウンドとして除去することができる。

SGD の観測は、コンプトン散乱が起こりやすい高エネルギー帯域が主となるが、低エネルギー側でも感度を持たせるための光電吸収 (Photo-Absorption) モードが用意されている。光電吸収モードでは、コンプトンカメラで観測した光子の位置情報は使用せず、スレシールド以上の信号を全て足し込むことで反応した光子のエネルギーを計算する。こうすることで光子の統計数が増え、低エネルギー側でも高感度を得ることができる。実際の光電吸収モードでは、コンプトンカメラの Si 層の上部 4 層のみを光子検出に使用する。光電吸収モードは公式のモードではないため、スペクトルを描く際に必要になるエネルギー応答関数などは公式サポート対象外となっている。

SGD の軌道上の観測により、予想以上に高エネルギー電子由来のバックグラウンドが多いことが確認されたが [92]、各層の検出のセレクションを変えるなど、criteria を工夫することで高感度観測を実現している。

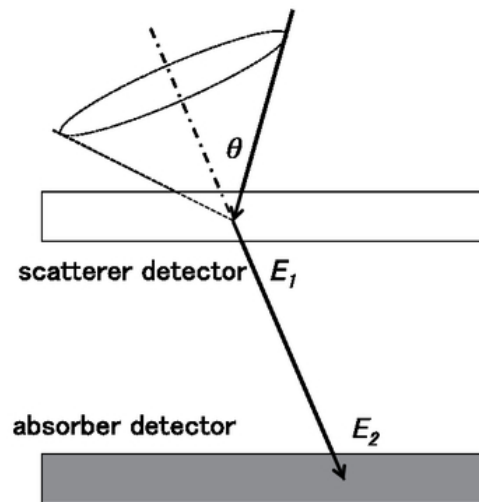


図 2.4: コンプトンコーンのイメージ [69]

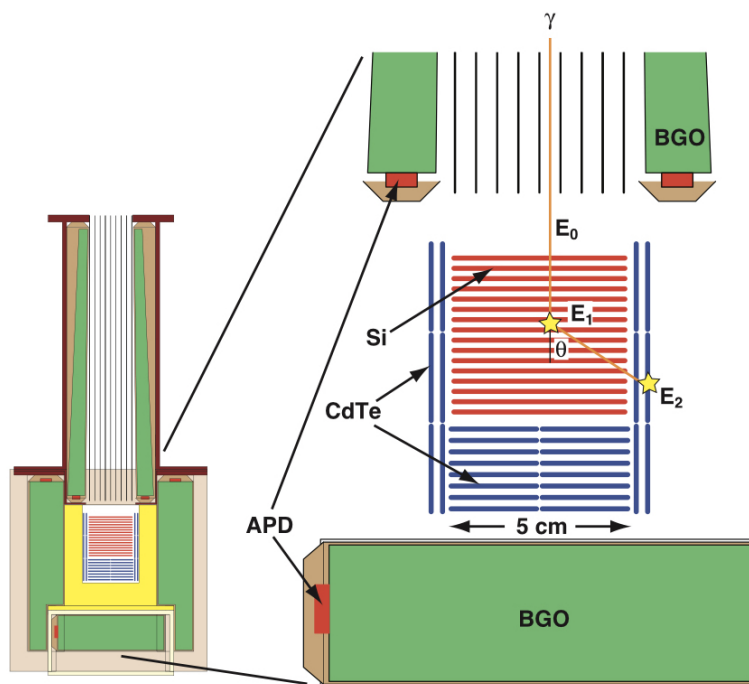


図 2.5: SGD 断面図 [85]

2.1.4 ひとみ衛星の時刻システム

検出器に X 線光子が入射したとき、一つ一つのイベントに対して時刻情報を与えることを時刻付けと呼ぶ。ひとみ衛星では、パルサーなどの時間変動の早い天体の観測にも対応できるよう、時刻付け精度の設計要求値が $350 \mu\text{sec}$ 以内と定められている。この要求値を達成するため、 $35 \mu\text{sec}$ 以内を目標に時刻システムの設計がなされている。

ひとみ衛星全体の時刻は、GPS 衛星からの時刻情報を基準に SpaceWire (SpW) [39] 規格によって制御されている。SpW は、衛星搭載機器間でデータ通信を行うための通信 I/F 及び通信プロトコルの仕様のことで、現在世界各国で宇宙機用データ通信規格として標準化が進んでいる。SpW を利用した、ひとみ衛星の時刻システムネットワーク概要図を図 2.6 に示す。ひとみ衛星では GPS 受信機 (GPSR) にて、GPS 衛星から 20 nsec 精度で時刻情報を受信している。この時刻情報は衛星中央制御コンピュータ (Satellite Management Unit: SMU) で処理された後、SpW 規格に即した tree 状のネットワークを通じて、検出器を含めた各搭載機器に配信される。時刻情報は秒以上と秒以下で配信するプロトコルが異なり、秒以下は SpW 規格が、秒以上は SpW の上位プロトコルの Remote Memory Access Protocol (RMAP) [71] が配信する。

ひとみ衛星では $35 \mu\text{sec}$ 以内の時刻精度が目標値であるが、SpW の規格では $1/64 \text{ 秒} (= 15.625 \text{ msec})$ 周期で情報配信を行うため、衛星全体の時刻情報の時間分解能は 15.625 msec になり、目標値を達成することができない。そこで、ひとみ衛星では各検出器に時間分解能が高い内部クロックを持たせ、検出器ごとに時刻付けを行っている。その後、検出器内部の時刻と、SMU から配信される時刻情報を組み合わせることで、光子イベント検出からテレメトリータの送信、衛星軌道を用いた太陽系中心補正まで、すべての系統誤差を足しあわせた精度として、光子イベントを $35 \mu\text{sec}$ 以内の精度で時刻付けを行うことができる設計である。このとき、検出器で付けられる時刻を LOCAL_TIME と呼ぶ。ひとみ衛星の各検出器での LOCAL_TIME クロックの時間分解能を表 2.2 に示す。

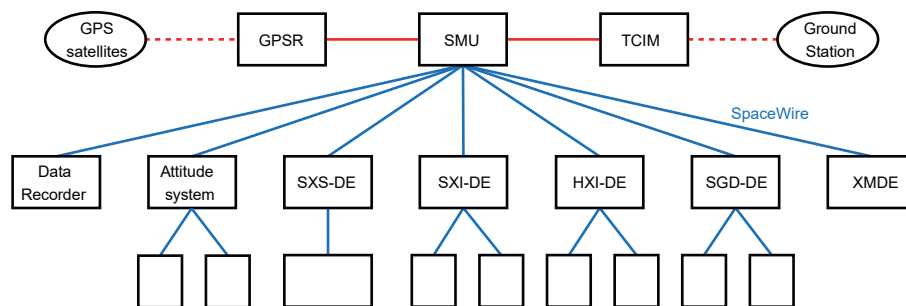


図 2.6: ひとみ衛星の時刻システムネットワーク [89]

表 2.2: LOCAL_TIME クロックの時間分解能 [89]

Instrument	Bit length	Time resolution
SXS	28-bits	$5 \mu\text{s}$
SXI	32-bits	$61.0 \mu\text{s}$
HXI	32-bits	$25.6 \mu\text{s}$
SGD	32-bits	$25.6 \mu\text{s}$
SGD-SHIELD	32-bits	16 ms

2.2 X 線天文衛星 Swift

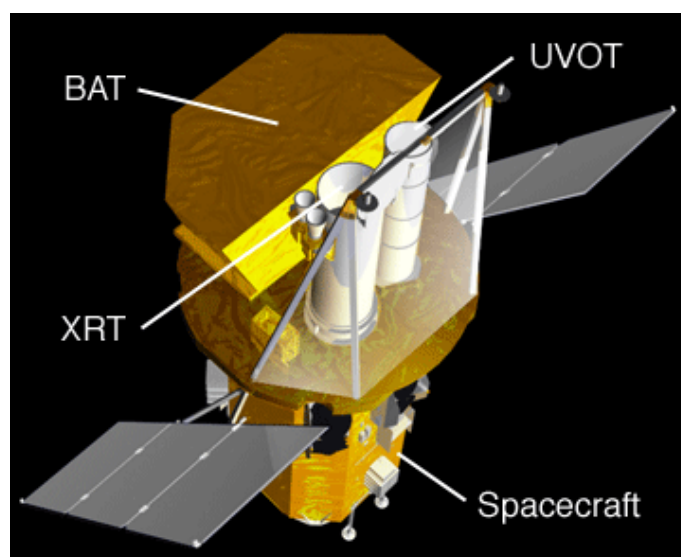


図 2.7: Swift 衛星イメージ [29]

The Neil Gehrels Swift Observatory (X 線天文衛星 Swift [29]) は、2004 年 11 月に打ち上げられた Gamma Ray Burst (GRB) 観測衛星である。(図 2.7) 1999 年に NASA の中規模エクスプローラー計画として採択され、アメリカ、イギリス、イタリアを中心に開発された。Swift 衛星には、Burst Alert Telescope (BAT)、X 線望遠鏡 (X-Ray Telescope: XRT)、紫外可視望遠鏡 (UltraViolet and Optical Telescope: UVOT) の三つの観測機器が搭載されている。BAT バーストイベントを検出すると、1 - 3 分角の精度でイベント到来位置を決定し、この情報をもとに XRT と UVOT をバーストの方向へ向けるシステムとなっている。これにより、バーストを検知後、可視光から軟 X 線帯域で撮像を伴った追観測を自動的に行うことができる。このとき、BAT の位置情報と光度曲線 (Light Curve: ライトカーブ) は、データ中継衛星のシリーズである TDRS へ約 20 秒で、そこから地上へ約 130 秒で送信され、GCN (The Gamma-ray Coordinates Network) に公開される。Swift 衛星は、XRT と UVOT の追観測ができるように、0 - 50° を 20 - 70 秒で回頭することができ、さらに完全自立姿勢制御システムが搭載されているので、姿勢制御のために地上からコマンドを送信する必要がない。

Swift 衛星が打ち上げれてから 10 年以上が経過しているが、2018 年現在も運用中である。Swift 衛星では、1,000 個以上の GRB を検出しており、世界の GRB 研究に大きく貢献している。また、GRB を観測していない期間は、他の天文衛星同様に天体を狙って観測している。Swift 衛星に搭載されている各検出器の主要パラメータを、表 2.3 に示す。

以降では、本研究で使用した BAT、XRT の詳細を述べていく。

表 2.3: Swift 衛星観測機器の主要パラメータ [29]

Instrument	Parameter	Value
BAT	Energy Range	15-150 keV
	Energy Resolution	~ 7 keV
	Aperture	Coded mask, random pattern, 50% open
	Detection Area	5240 cm^2
	Detector Material	CdZnTe (CZT)
	Detector Operation	Photon counting
	Field of View (FOV)	1.4 sr (half-coded)
	Detector Elements	256 modules of 128 elements/module
	Detector Element Size	$4 \times 4 \times 2 \text{ mm}^3$
	Coded-Mask Cell Size	$5 \times 5 \times 1 \text{ mm}^3$ Pb tiles
	Telescope PSF	< 20 arcmin
	Source Position and Determination	1-4 arcmin
XRT	Sensitivity	$\sim 10^{-8} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
	Number of Bursts Detected	$> 100 \text{ yr}^{-1}$
	Energy Range	0.2-10 keV
	Telescope	JET-X Wolter 1
	Detector	E2V CCD-22
	Effective Area	110 cm^2 @ 1.5 keV
	Detector Operation	Photon counting, integrated imaging, and timing
	Field of View (FOV)	23.6×23.6 arcmin
	Detection Elements	600×602 pixels
	Pixel Scale	2.36 arcsec
UVOT	Telescope PSF	18 arcsec HPD @ 1.5 keV
	Sensitivity	$2 \times 10^{-14} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (1 mCrab) in 10^4 s
	Wavelength Range	170-600 nm
	Telescope	Modified Ritchey-Chrétien
	Aperture	30 cm diameter
	F-number	12.7
	Detector	Intensified CCD
	Detector Operation	Photon counting
	Field of View (FOV)	17×17 arcmin
	Detection Elements	2048×2048 pixels
	Telescope PSF	0.9 arcsec FWHM @ 350 nm
	Colors	6
	Sensitivity	B = 24 in white light in 1000 s
	Pixel Scale	0.5 arcsec

2.2.1 Burst Alert Telescope: BAT

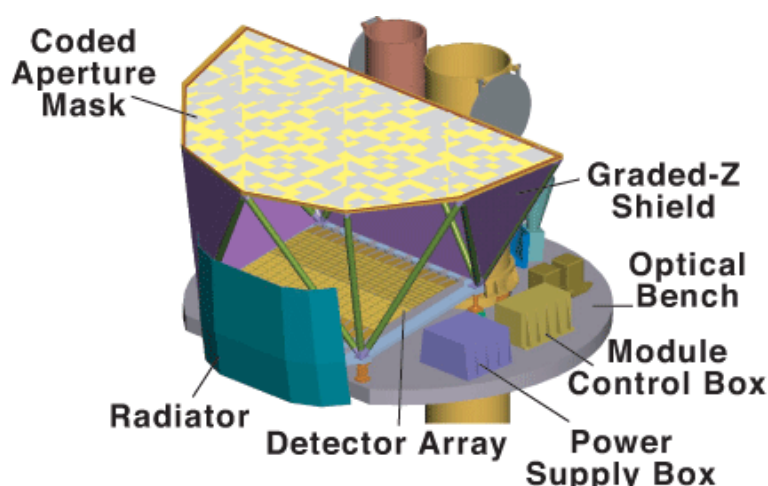


図 2.8: BAT イメージ [29]

Burst Alert Telescope (BAT) [8] は、イベント検出に符号化マスク (Coded-Mask) を用いた符号化開口望遠鏡であり、GRB の発生を高感度・広視野でモニタするための検出器である。BAT は 1.4 - 2.2 sr の広視野で、イベントの検出タイミングを計るクロックの時間分解能は 100 μsec である。また、検出素子に CdZnTe を用いており、15 - 150 keV に感度を持つため、GRB 等のバースト現象を探索しながら硬 X 線帯域で天体の観測も行っている。

符号化マスクは、X 線を透過しないような原子番号の大きい金属の板に、ランダムなパターンの入射口を開けたものである。それ単体では検出機能を持たないので、金属板と離れたところに平行な入射面の二次元位置検出器を置いてイベントを検出する。1 個の点光源から X 線光子が並行入射した場合、符号化マスクの影が距離 L だけ離れた位置の検出器上に落ちる。このとき、穴の一次元方向の大きさを a とすると、検出された影パターンと、事前に分かっているマスクパターンとで二次元相互相関をとることで、点源の位置が角度分解能 a/L から決めることができる。(図 2.9) この原理により、広がった X 線源でも像を合成することができる。符号化マスクの入射口の面積と X 線を塞ぐマスクの面積の割合は、通常 50 % で、マスクパターンに必要な条件は、(i) パターンの自己相関は δ 関数になること、(ii) 投影像の信号とバックグラウンドの比が最適な値をとることである。

符号化マスクでは、上記の通り位置決定ができるだけでなく、スペクトルを求める際のバックグラウンド除去も効率的に行える。天体からの光源でマスクが照らされると、開口部を通過して光子が直接検出器に当たった部分がフォアグラウンドとなる。一方、他の天体からの X 線や宇宙線、衛星の放射化による X 線、光子がコンプトン散乱したものなどは他のピクセルに入射し、これらがバックグラウンドとなる。このバックグラウンドはマスクのパターンによらず、各ピクセルに対して一様に検出されるので、フォアグラウンドにあたるピクセルとの差分を取ることで、特定の天体からくる X 線のみを取り出すことができる。つまり、照射ピクセルの合計スペクトルから、そのほかのピクセルの合計スペクトルを差し引くことで、バックグラウンドを引いた、天体からのスペクトルが得られる。

BAT のオペレーションは、Event モードと Survey モードがある。Event モードは、GRB 等のバーストを感知したときに移行するモードで、バースト方向を向いている間の Pointing Data と、バーストの終始で視線方向を変更している間の Slewing Data が得られる。Event モードはバースト発生時だけでなく、硬 X 線天体に観測時にも用いられる。対して Survey モードは、バーストが発生していない間に滞在するモードである。バーストの検出を目的としているので、ある程度の秒数 (64 msec - 1.6 sec)

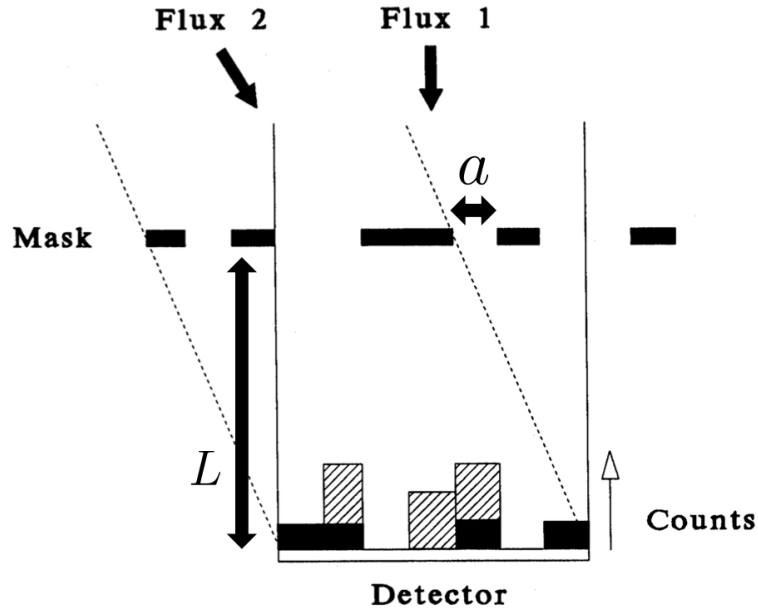


図 2.9: 符号化マスクの検出イメージ ([40]: Fig 3.1 改)

でビンまとめたライトカーブのデータを提供する。

2.2.2 X-Ray Telescope: XRT

Swift 衛星搭載の X-Ray Telescope (XRT) [14] は、0.2 - 10 keV のエネルギー帯に感度をもつ X 線望遠鏡で、BAT が GRB の位置を決定し、数百秒後に 5 秒角の精度で GRB の残光の分光観測と撮像を行うことができる。XRT は、斜入射型の多重反射鏡である X 線望遠鏡と、検出部の X 線 CCD (Charge Coupled Device) カメラで構成されている。(図 2.10) 望遠鏡部分のミラーは Spectrum X-Gamma 衛星に搭載された JET-X [18]、CCD カメラは XMM-Newton 衛星に搭載された EPIC [37] と同様のものを用いている。

X 線 CCD は半導体を二次元的に並べた検出器で、光電吸収された X 線のエネルギーに比例した数の電子を計測することで、入射光子のエネルギーを決定する。CCD は基本的に、金属の電極と半導体に、酸化物の絶縁層を挟んだ MOS (Metal Oxide Semiconductor) で構成されている。ここでは例として、p 型半導体を用いた CCD の検出原理を紹介する。電極に正電圧をかけると、p 型半導体部分では多数のキャリアである正孔が電極と逆向きに移動し、一時的にキャリアのない空乏層 (Depletion Layer) という領域を形成する。この空乏層内で X 線が光電吸収されると電子と正孔の対が生成され、電極に印加した電圧により、電子が空乏層内の絶縁層付近に移動し蓄積される。そして、電極に加える電圧を規則的に変化させることで、蓄積された電荷を読み出し口まで転送し、最終的に X 線のエネルギーを電圧信号として読み出すことができる。

CCD は、その受光方向の違いにより表面照射型 (Front-Illuminated) CCD と裏面照射型 (Back-Illuminated) CCD の 2 種類に分けられる。表面照射型 CCD は電極側を受光面とし、裏面照射型はその反対側を受光面としている。表面照射型は電極側から入射させるため、X 線が空乏層のうち電極近くで吸収されやすい。そのため、多数の電子が電極へ向かう際に起こる拡散や再結合が起きにくく、エネルギー分解能に優れている。しかし、受光面の電極や絶縁層を透過するためのエネルギーが必要になるため、低エネルギー側の感度が悪くなっている。対して裏面照射型は、受光面を逆にすることで低エネルギー

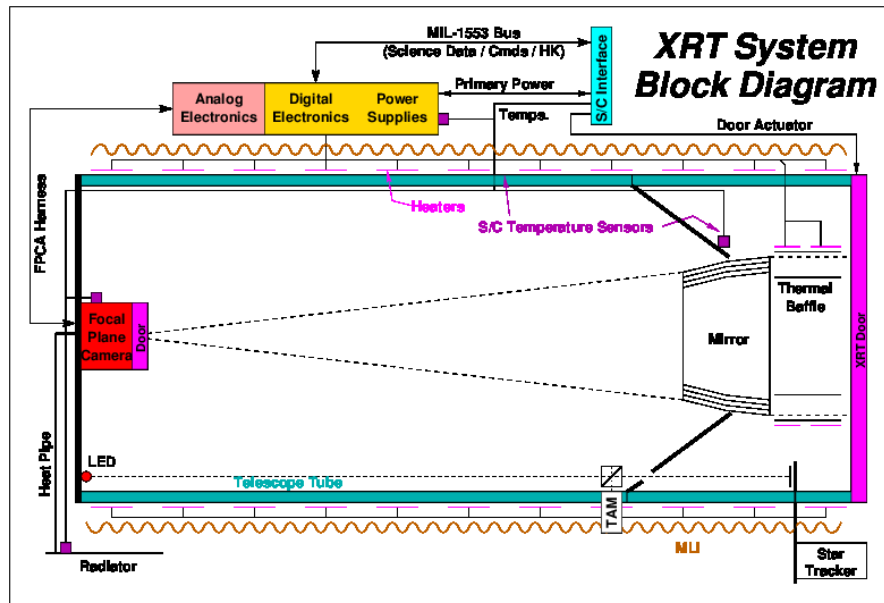


図 2.10: XRT 概要図 [14]

ギー側にも感度を持つが、吸収される位置が電極から遠ざかるためエネルギー分解能が落ちてしまう。XRT の場合では、これらのうち 600×600 ピクセルの表面照射型 CCD を -100°C で使用している。

XRT は CCD の読み出し方によって、Image (IM) mode、Photodiode (PD) mode、Windowed Timing (WT) mode、Photon-Counting (PC) mode の 4 つの観測モードが用意されている。

Image (IM) mode

露光時間を長くとり (0.1 or 2.5 sec) ことで高解像度の撮像が可能。読み出し間隔が長く、1 つのピクセルに 2 つ以上の光子が同時に入射 (Pile-Up) する確率が高くなるため、スペクトルは描けない。

Photodiode (PD) mode

時刻精度に特化したモード。IM モードとは逆に画像を撮ること諦め、2 方向の情報を積算して一度に読み出すことで 0.14 msec の高時間分解能を実現する。残念ながら、2005 年に使用不可となっている。

Windowed Timing (WT) mode

高時間分解能モード。1 方向の情報のみ積算して読み出すことで時間分解能を上げている。時間分解能は PD モードに劣る 1.7791 msec で、1 次元の画像とスペクトルが得られる。

Photon-Counting (PC) mode

2 次元画像とスペクトルが得られる通常モード。ピクセルで得られた情報をデータ格納領域 (framestore area) に一旦移してから丁寧に読み出すため、時間分解能は悪い。(2.5 sec)

第 3 章 同時観測と Data Reduction

2016 年 2 月に打ち上げられたひとみ衛星は、衛星全体の時刻較正を目的として、同年 3 月末に Crab パルサーの観測を行った。また、同じ X 線天文衛星の Swift と地上電波望遠鏡でも同時に観測を行った。本章では X 線と電波帯域の同時観測についてと、電波観測で決定された Crab パルサーの各種パラメータについて述べる。

パルサーからの信号の決定時刻を比較する際、X 線帯域では Pulse Profile を用いる。X 線の Pulse Profile を描くには、衛星で観測されたデータに対していくつかの補正を加えたり、不要なデータを削る必要がある。そこで本章では、X 線で観測されたデータに対して行った Reduction についてと、X 線帯域での Pulse Profile の描画方法についても説明する。

3.1 X 線と電波の同時観測

今回、ひとみ、Swift 衛星と同時観測を行った地上電波望遠鏡は、NICT (National Institute of Information and Communications Technology) で運営されている鹿島宇宙技術センターの 34 m 電波望遠鏡 [88] と、東北大学にある 31×16.5 m の Iitate Planetary Radio Telescope (IPRT) [90] である。鹿島電波望遠鏡は 1.4 - 1.7 GHz、IPRT は 323.1 - 327.1 MHz で観測を行った。同時観測を行った時期を、表 3.1 に示す。また、解析に用いる Crab パルサーの周期や天体位置などの各種パラメータ (Ephemeris) は、電波帯域の観測で決定する。本研究では、ジョドレルバンク天文台で定期的に公開されている Crab パルサーの Ephemeris [59] を使用する。2016 年 3 月次点で決定された、Crab パルサーの Ephemeris を表 3.2 に示す。

表 3.1: Crab パルサーの同時観測時期

観測機器	観測時期
ひとみ	2016/3/25 12:17:00 - 18:01:00 (UT)
Swift	2016/3/25 12:09:01 - 17:21:04 (UT)
鹿島電波望遠鏡	2016/3/25 03:00:00 - 14:00:04 (UTC)
IPRT	2016/3/25 09:30:00 - 13:00:00 (UTC)

表 3.2: Crab パルサーの Ephemeris

周期 P	33.7204396077250 sec
周期変動率 $\dot{P}$	$4.1981605 \times 10^{-13}$ s/s
Main Pulse 到来時刻	57472.0000002874260532 (MJD) ^{*a}
赤経 RA	83.633218 h
赤緯 DEC	+22.014464 °

^{*a} 修正ユリウス日 (Modified Julian Date)。1858/11/17 12:00:00 (UT) を起点とした日数

3.2 Data Reduction

衛星から送られる生データ (Unscreened Event Data) は、天体を観測していない時間帯が含まれていたり、検出器由来の補正が行われていない。そこでアーカイブには、生データを各種ツールで補正し直した Cleaned Event Data が公開される。このとき、「ひとみ」、Swift 衛星では観測データを FITS (Flexible Image Transport System) 形式で公開している。

本研究では Fits データの補正・解析ツールとして、NASA から提供されている HEASoft (ver.6.22.1) を用いる。また、衛星全体と各検出器の補正データである CALDB は、表 3.3 に示すデータを使用する。本研究の解析では、これらを用いて補正した Cleaned Event Data に対し、さらに追加の補正とデータ選別をしていく。

表 3.3: CALDB version list

ひとみ	GEN (20170208), SXS (20161122), HXI (20161122), SGD (20170926)
Swift	MIS (20170831), XRT (20170501), BAT (20090130)

3.2.1 Barycentric Correction

衛星は地球の周りを周回しているとき、地球は太陽の周りを周回している。光は地球半径分の距離を進むのに 20 msec、太陽までだと 8 分程かかるため、他の衛星と時刻を合わせる際には、衛星の軌道運動による効果を打ち消す必要がある。その際、時刻を地球中心の値に変換 (Geocentric Correction) をしてから、観測時期の違いによって起こる地球の公転運動の効果を打ち消すために、太陽中心での時刻に補正 (Heliocentric Correction) をする必要がある。また、他の時期の観測と比較するには、さらに惑星の運動をすべて加味した太陽系重心への変換が必要となる。これを Barycentric Correction と呼ぶ。特に周期の早いパルサーなどの天体を他衛星と比較するときには、この補正が必要となってくる。

Barycentric Correction は HEASoft を用いる。今回、「ひとみ」のデータに対しては "barycen"、Swift のデータに対しては "barycorr" をそれぞれ使用し、太陽系重心の時刻である太陽系力学時 (TDB: Barycentric Dynamical Time) に変換する。このとき、各衛星のクロックがどこからカウントしているかの基準時刻が異なるため、それを参照する必要がある。(表 3.4) また、補正の際に (1) 天体の位置、(2) 衛星の軌道位置のパラメータが必要になる。電波観測のデータについても TDB への変換が行われている。

表 3.4: ひとみ、Swift 衛星の基準時刻

観測衛星	基準時刻 (MJD)	基準時刻 (UTC)
ひとみ	56658.0007775925925926	2001/01/01 00:00:00
Swift	51910.00074287037000000000	2014/01/01 00:00:00

3.2.2 各検出機器の Data Reduction

SXS

ひとみ衛星の全観測中、SXS はゲートバルブを閉じて観測を行っていたため、2 keV 以下の X 線が遮断されている。そのため、本研究で使用する SXS のエネルギー帯域は 2 - 10 keV である。データは Cleaned Event Data を使用し、特に Reduction は行わない。

HXI

HXI では撮像イメージが取得できるので、イメージによるイベントセレクションが可能である。本研究では、Crab パルサー本体の中心から 70 秒角の領域を使用する。(図 3.1) ひとみ衛星には HXI1、HXI2 の 2 つが搭載されているので、以降で示す HXI の観測データは、HXI1 と HXI2 のデータを足し合わせたものとする。

SGD

SGD の通常オペレーションでは統計数が少ないため、光電吸収モードのデータを使用する。光電吸収モードは 2.1.3 節 で述べたように、Si レイヤーの上部 4 層を使用するため、Cleaned Event Data は用いず、Unscreened Event Data から条件を与えてセレクションをする必要がある。光電吸収モードのセレクション条件を付録 B.1 に示す。光電吸収モードでは、高エネルギーではなく低エネルギー側に感度がシフトするので、10 - 300 keV の帯域が感度になる。

ひとみ衛星には SGD1 と SGD2 の 2 つが搭載されているが、SGD2 は Crab 観測中に通常オペレーション (nominal operation) ではない区間を含むため、本研究では除外する。また、SGD にはコンプトンカメラが 3 台搭載されているが、FITS データはコンプトンカメラごとに生成されるので、以降で示す SGD1 の観測データは、SGD1 コンプトンカメラ 3 台の観測データを足し合わせたものとする。

XRT

現存するモードの中で、一番時間分解能の良い WT モードのデータを使用する。また、エネルギー帯域は感度が良い 2 - 10 keV 帯域を使用する。

観測データでは、15:19:58 - 15:37:18 の約 17 分間、X 線のカウントレートが他の区間よりも下がっていた。そこで、衛星の姿勢データから視線方向の情報を参照してみたところ、この期間に姿勢が揺らぎ Crab パルサーから視線がズレていたことが分かった。(付録 B.2) そのため、XRT の観測データからこの期間を除外して解析を行う。

BAT

Swift 衛星が Crab パルサーを観測していたのは、表 3.1 より 12:09:01 - 17:21:04 であるが、BAT が Event モードに滞在していたのは 12:28:02 までである。それ以降は Survey モードに滞在していたので、光子一つ一つの情報を記録したいいわゆる Event Data は無い。そのため、本研究で用いた BAT の観測データは 12:09:01 - 12:28:02 の期間のみである。Event Data は Pointing Data を使用する。

Data Reduction 後の、全検出器における Crab パルサーのライトカーブを図 3.2 に示す。ここで、赤のデータは電波望遠鏡との同時観測期間を示す。また、各検出器で観測した Crab パルサーからの X 線イベント数と、パルサーの回転数、観測時間を表 3.5 に示す。括弧内は電波望遠鏡と同時観測した期間での数値である。

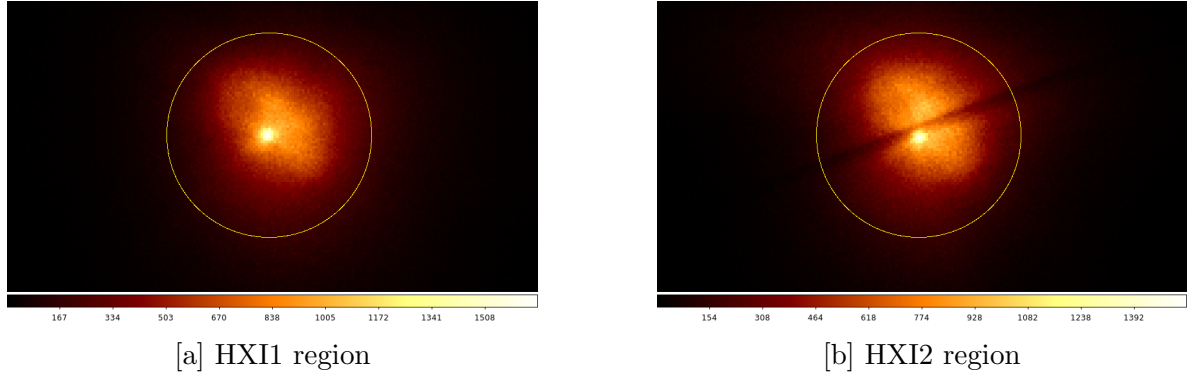


図 3.1: HXI region selection. 円: Crab パルサー中心から 70 秒角の位置

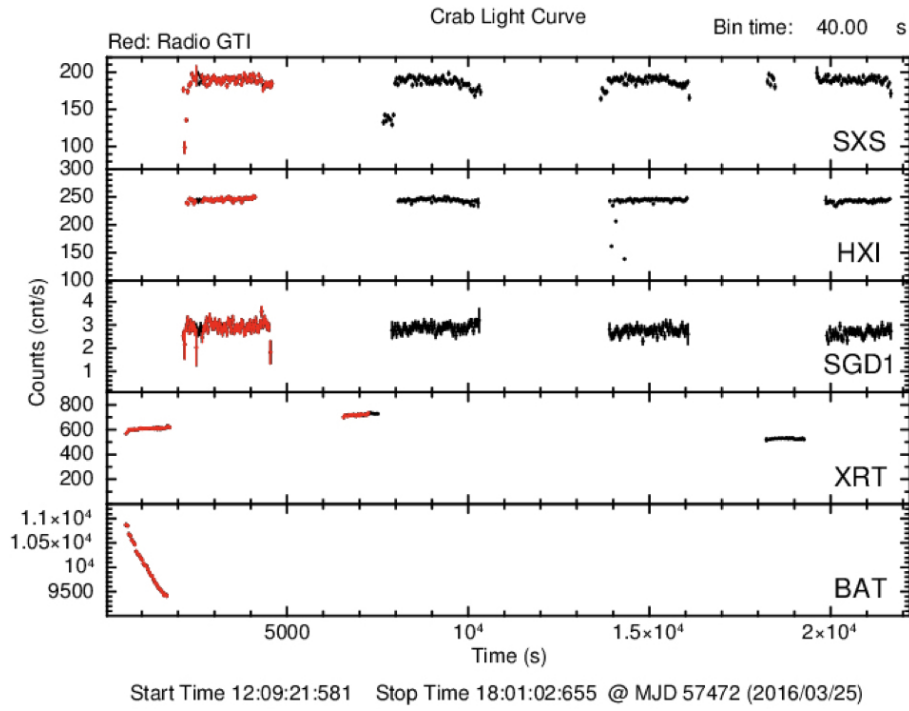


図 3.2: ひとみ、Swift 衛星各検出器での Crab パルサーのライトカーブ。赤: 電波望遠鏡との同時観測期間

表 3.5: 各検出器での X 線イベント

検出器	エネルギー帯域 [keV]	イベント数 (電波同時観測期間)	Cycle 数	観測時間 [ksec]
SXS	2 - 10	1,813,212 (408,996)	287,872 (64,555)	9.7 (2.2)
HXI	5 - 80	3,889,132 (838,273)	236,550 (50,725)	8.0 (1.7)
SGD1	10 - 300	72,803 (18,810)	63,552 (16,254)	8.6 (2.1)
XRT	2 - 10	1,831,675 (1,141,431)	88,123 (52,154)	2.9 (1.8)
BAT	15 - 150	11,463,136 (10,547,923)	33,670 (31,052)	1.14 (1.05)

3.3 X 線の Pulse Profile: 畳み込みライトカーブ

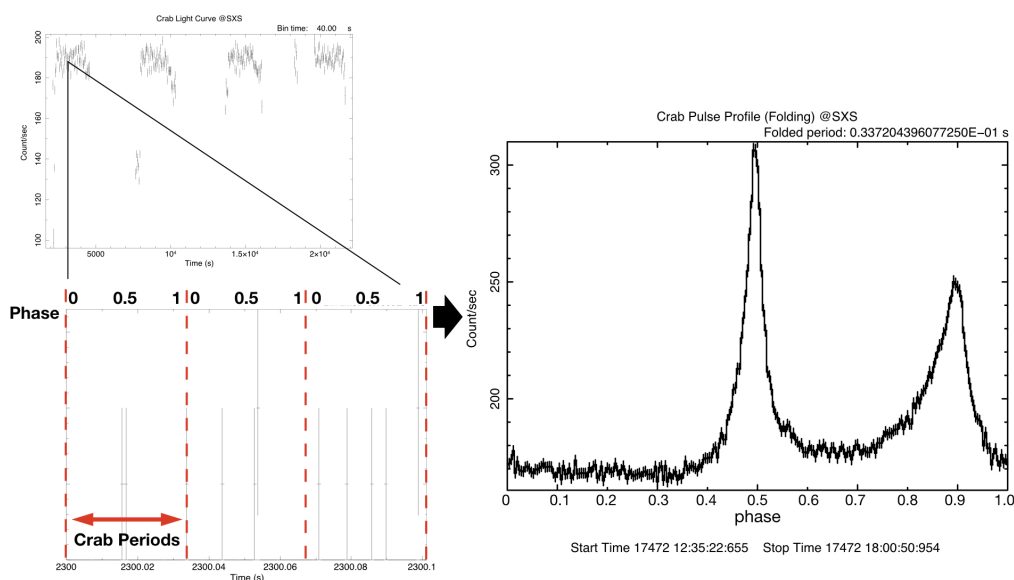


図 3.3: 畳み込みライトカーブの作成方法

X 線、 γ 線帯域の観測は光子を一つ一つ検出して行うため、得られるライトカーブは光子の統計数に大きく依存する。しかし、実際の観測では天体から発せられる全ての光子を検出できるわけではなく、天体から衛星までの間に起こる相互作用、検出器の感度によって光子の統計数は減ってしまう。そのため、パルサーなどの時間変動の早い天体では、短い周期の間に検出できる光子数が少なく、ライトカーブ上でその変動を確認することは難しい。そこで、高エネルギー帯域でのパルサーの Pulse Profile には、一般的に畳み込みライトカーブが用いられる。畳み込みライトカーブとは、観測で得られるライトカーブを天体の変動周期間隔で分割し、1 周期の長さのライトカーブに重ね合わせたもので、観測された全光子を 1 周期長のライトカーブ上に集約することができる。これにより、1 周期あたりの光子の統計数が増えるので、天体の周期的変動を確認することができる。

畳み込みライトカーブ作成の例を図 3.3 に示す。畳み込みライトカーブの作成には (1) 時間変動の周期、(2) 周期の変動率、(3) 位相 (Phase) の基準点の情報が必要になる。まず、(1) と (2) のパラメータを元にライトカーブを周期の長さで分割する。(例では、Crab パルサーの周期: 約 33 msec) 次に、分割したライトカーブに対して 0 - 1 の Phase を割り当てる。最後に、複数枚のライトカーブを重ね、同じ Phase に相当する光子を足し合わせる。こうすることで全ライトカーブの光子の情報を、Phase のヒストグラム 1 枚で表すことができる。このとき、Phase の振り方はライトカーブのどの位置を切るかで変わるため、Phase = 0 の位置をどこにするかの (3) の情報が追加で必要となる。図 3.3 の例では、Main Peak が 0.5 Phase の位置に来るようにライトカーブを分割している。このようにして畳み込みライトカーブは作成される。

本研究で観測した Crab パルサーの Pulse Profile (畳み込みライトカーブ) を図 3.4 に示す。ひとみ、Swift 各検出器で得られたライトカーブ (図 3.2) で畳み込みを行い作成した。パラメータには Crab パルサーの Ephemeris (表 3.2) より、(1) P 、(2) $\dot{P}$ と、(3) Phase = 0 で Main Pulse 位置にくるように、Main Pulse 到来時刻を用いた。図 3.4 では、Pulse Profile を見やすくするため Phase が $-0.5 - 0.5$ の区間を表示している。また、畳み込みライトカーブにはパルス以外のバックグランド成分も含まれる。そのため、パルスの無い期間 ($-0.4 < \text{Phase} < -0.2$) をバックグランドのカウントとして定義し、その期

間の平均カウント数を全体から引いている。また、 $1 \text{ bin} = 1/250 \text{ Phase}$ になるようにビンまとめしている。

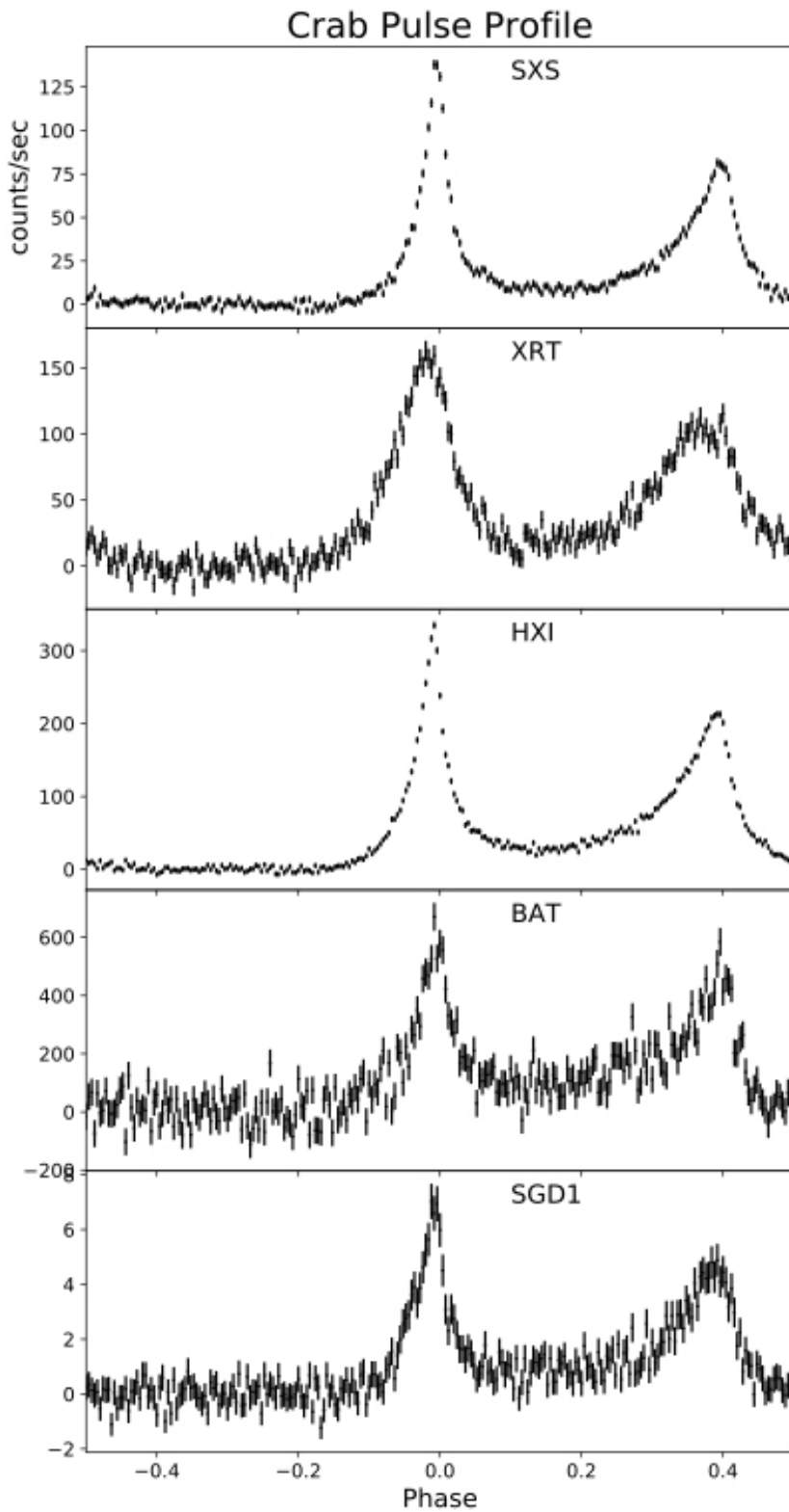


図 3.4: Crab パルサーの Pulse Profile (畳み込みライトカーブ)

第 4 章 絶対時刻精度とパルス検出性能の検証

4.1 絶対時刻精度の評価

ひとみ衛星は 2.1.4 節 で述べたように、絶対時刻精度の要求値 ($350 \mu\text{sec}$) を満たすため、 $35 \mu\text{sec}$ 以内の時刻精度を目標に設計された衛星である。打ち上げ前の地上試験ではこの目標値を達成しているので (Terada et al. (2017) [89])、あとは実際の観測で時刻精度を確認する必要がある。本研究では、電波や Swift 衛星での Crab パルサーの同時観測結果を利用し、ひとみ衛星で検出されるパルス到来時刻を他観測と比較し、電波パルス到来時刻を基準とした絶対時刻精度を評価する。また、観測のエネルギー帯域ごとに電波時刻からのずれをまとめている Molkov et al. (2010) [68] の結果を用いて、Swift 以外の他衛星との比較も行う。

4.1.1 評価方法

絶対時刻精度の評価には、3.3 節 で作成した各検出器の畳み込みライトカーブを用いる。評価方法は、畳み込みライトカーブの Main Pulse Peak 周りを Fitting し、Fitting 結果の Peak 位置を検出したパルスの到来時刻として評価する。過去の研究では、Crab パルサーの Main Pulse の Fitting に、Gauss 関数 [68] や Lorentz 関数 [50] などが用いられている。本研究では、Fitting 関数に Gauss 関数、Lorentz 関数に加え、Gauss 関数 と Lorentz 関数を畳み込んだ Voigt 関数の 3 つを用いて行い、それぞれの Fitting 結果で Peak 位置が大きく変わらないことを最初に確認した。(付録 C) この結果を踏まえ、以降の Fitting では Gauss 関数のみを用いる。

畳み込みライトカーブの作成に使用した表 3.2 のパラメータは、電波帯域での観測結果である。つまり、”Main Pulse 到来時刻” を Phase の起点としてライトカーブを畳み込んだ場合、Phase = 0 の位置は電波放射を観測した時刻に相当する。そこで本研究では、電波放射の時刻を基準として、各検出器の絶対時刻を評価する。また、先行研究 (Molkov et al. (2010) [68]) による他検出器との比較も行う。

4.1.2 各検出器の絶対時刻差

Gauss 関数の Fitting 結果と、それより求めた各検出器毎の Main Pulse Peak 位置を図 4.1、表 4.1 に示す。ここで、赤破線は絶対時刻の基準点である電波観測での Peak 位置を表す。1 位相 = Crab Periods (約 33 msec) であるから、電波到来時刻からのずれを μsec 単位に換算して各検出器毎に表示している。

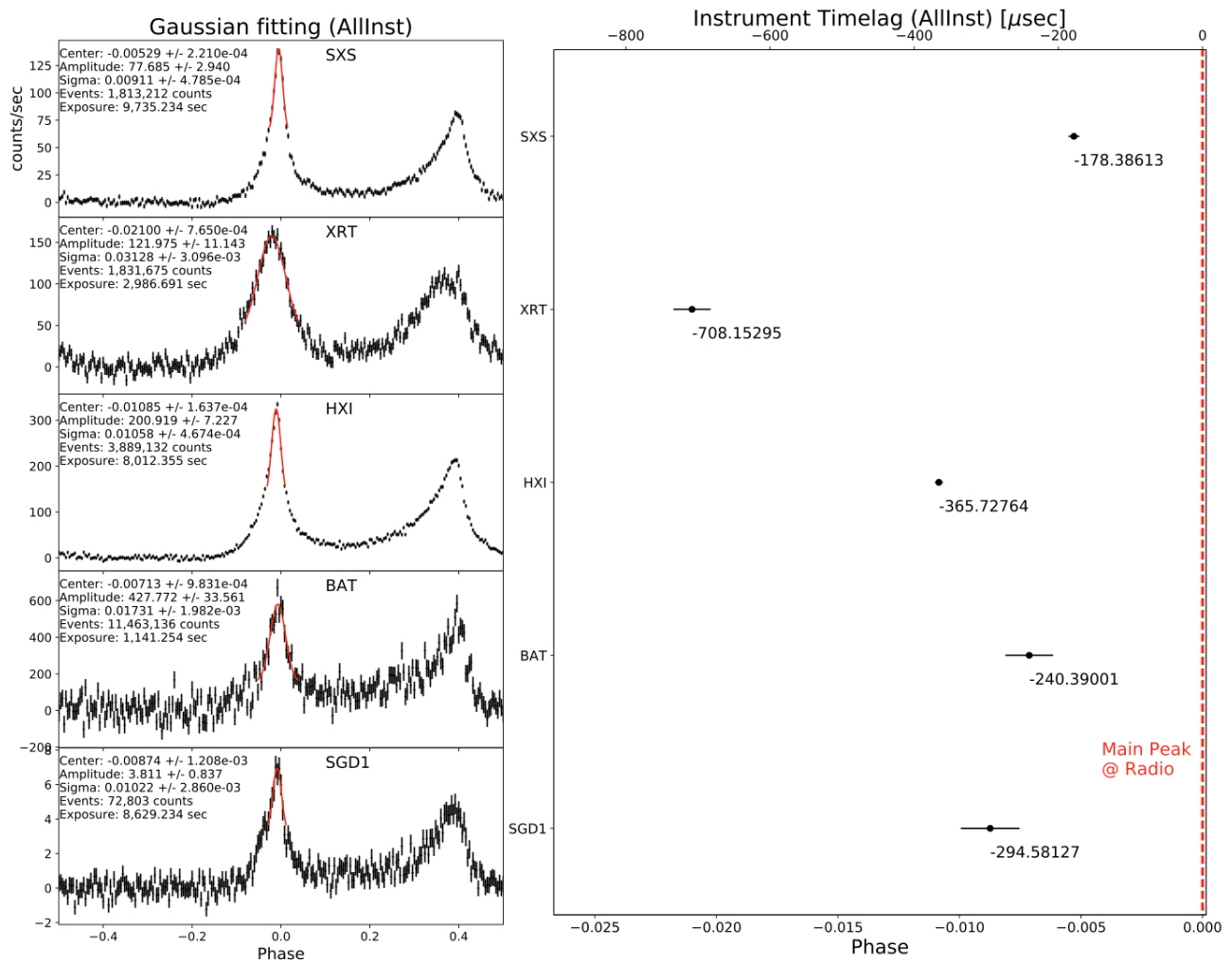


図 4.1: Gauss 関数 Fitting と Main Pulse Peak 位置。赤破線: 電波観測での Main Peak 位置 (Phase = 0)。電波放射時刻からの時刻ずれも μsec 単位で表示している。

表 4.1: 各検出器の Peak 位置と電波放射との時刻ずれ

検出器	エネルギー帯域 [keV]	Peak 位置 [Phase]	電波からの時刻ずれ [μsec]
ひとみ/SXS	2 - 10	$-0.0053 \pm 2.210 \times 10^{-4}$	-178.38613
Swift/XRT	2 - 10	$-0.0210 \pm 7.650 \times 10^{-4}$	-708.15295
ひとみ/HXI	5 - 80	$-0.0109 \pm 1.637 \times 10^{-4}$	-365.72764
Swift/BAT	15 - 150	$-0.0071 \pm 9.831 \times 10^{-4}$	-240.39001
ひとみ/SGD1	10 - 300	$-0.009 \pm 2.210 \times 10^{-3}$	-294.58127

4.1.3 パルス到来時刻の他検出器との比較

前節で求めた各検出器ごとの絶対時刻を、他検出器と比較する。他検出器のエネルギー帯域で分けてプロットした結果を図 4.2 に示す。ここで、電波放射時刻よりも早く Peak が来る場合を負としているため、Molkov et al. (2010) [68] の数値は正負を逆にして表示している。

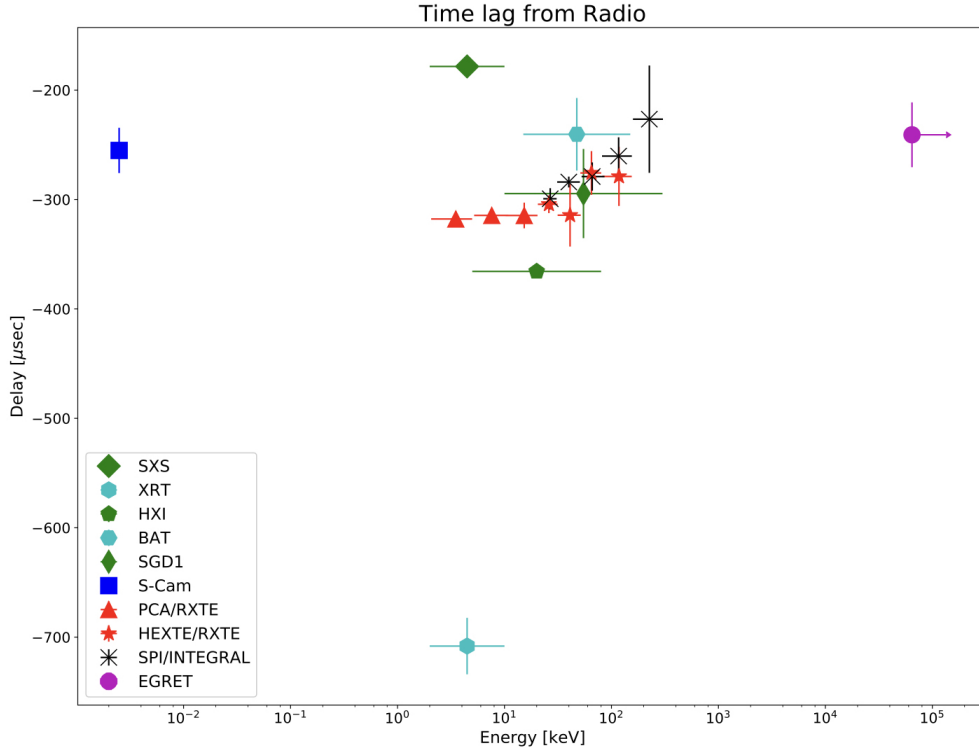


図 4.2: パルス到来時刻の他検出器との比較。Molkov et al. (2010) [68] の結果は、縦軸の正負を逆にして表示している。ひとみ/SXS, HXI, SGD1 (緑色)、Swift/XRT, BAT (水色) で、それ以外は Molkov et al. (2010) [68] (S-Cam, RXTE, INTEGRAL, EGRET) を示す。

4.1.4 考察

まず、ひとみ衛星の検出器のみに注目して時刻精度を評価する。各検出器間の最大時刻差は SXS と HXI 間の $187 \mu\text{sec}$ で、最小でも HXI と SGD1 間の $71 \mu\text{sec}$ という結果になった。

次に、同エネルギー帯域を観測した Swift 衛星の検出器と比較してみる。XRT が他検出器よりも大きく時刻決定値がずれているが、Cusumano et al. (2012) [22] で同衛星搭載の BAT と約 $270 \mu\text{sec}$ 時刻決定値がずれていることがわかっている。今回の観測では、Cusumano et al. (2012) [22] で見積もられた以上に、BAT と XRT の時刻差が大きい結果 ($\sim 468 \mu\text{sec}$) となったが、XRT のパルス到来の決定時刻が BAT よりも早いという傾向は、先行結果と同様であった。ひとみ衛星の検出器と BAT の時刻決定値との比較では、 $54 \sim 125 \mu\text{sec}$ の時刻差が見られた。

最後に、各検出器の時刻決定値を Molkov et al. (2010) [68] の結果と比較してみる。ひとみ衛星搭載検出器では、Molkov et al. (2010) [68] で見られる傾向から時刻精度目標値 ($35 \mu\text{sec}$) 以内だったのは SGD1 のみだったが、HXI, SXS は要求値 ($350 \mu\text{sec}$) 以内であり、軌道上の観測で要求値を満たしていることが確認できた。

4.2 検出器の時間分解能と Pulse 検出性能

図 3.4 から分かるように、Crab パルサーの Main、Inter 両方のパルスの幅が各検出器毎に異なっている。これは、検出器の時間分解能の違いが影響していると考えられる。時間分解能は、検出器が光子を分別できる最小時刻であり、時刻決定の不定性そのものである。そのため、時間分解能が悪いとパルスの到来時刻が大きく揺らいでしまい、結果としてパルスが幅を持って検出されてしまう。このように、パルサーのような時間変動の早い天体を捉えるには、時間分解能のパラメータが重要になってくる。ここでは、Crab パルサーの Main Pulse のパルス幅を測ることで、時間分解能の違いによるパルスの検出性能を検証する。

4.2.1 検証方法

パルスの最大値から半分の値になる位置の幅 (半値全幅: FWHM) をパルス幅と定義する。パルスは、前節同様 Gauss 関数で Fitting し、その結果から FWHM を求める。今回は、光子の統計的揺らぎが小さく、パルスの形状が比較的整っている SXS、XRT、HXI で性能評価する。

各検出器の時間分解能を表 4.2 に示す。さらに今回は、検出器の時間分解能を擬似的に落とし、時間分解能とパルス幅の関係を細かく見ていく。時間分解能の落とし方のイメージを図 4.3 に示す。時間分解能はクロックの最小単位と考えることができるので、最小のクロックサイズを大きくすれば時間分解能は落ちることになる。例として、検出器の時間分解能が 1 sec で、時間分解能を 5 sec に落としたい場合を考える。図 4.3 のように、1 sec クロックで 00:03 と判定したイベントなら、5 sec クロックでは次にラッチされる 00:05 のイベントとして認識される。このように、観測されたイベントを任意の時間分解能に落とす場合、各イベント時刻を時間分解能によって決まるラッチタイミングまで切り上げれば良い。

今回の検証で落とした時間分解能を表 4.3 に示す。ここで、Crab パルサーの周期である約 33 msec に対し、10 msec まで時間分解能を落とすとパルスそのものを検出できないので、落とす時間分解能は 5 msec までとする。また、時間分解能を落とすと、図 4.3 で示したように、光子のラッチタイミングが遅れることになるので、パルスの到来時刻決定値に影響を及ぼすはずである。そこで時間分解能を落としたときのパルス到来時刻決定値も検証する。パルスの時刻決定は、前節同様 Gauss 関数 Fitting によって求める。

表 4.2: 各検出器の時間分解能

検出器	エネルギー帯域 [keV]	時間分解能 [μ sec]	落とした時間分解能 [μ sec]
ひとみ/SXS	2 - 10	5	10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000
Swift/XRT	2 - 10	1779.1 (WT)	2000, 5000
ひとみ/HXI	5 - 80	25.6	50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000

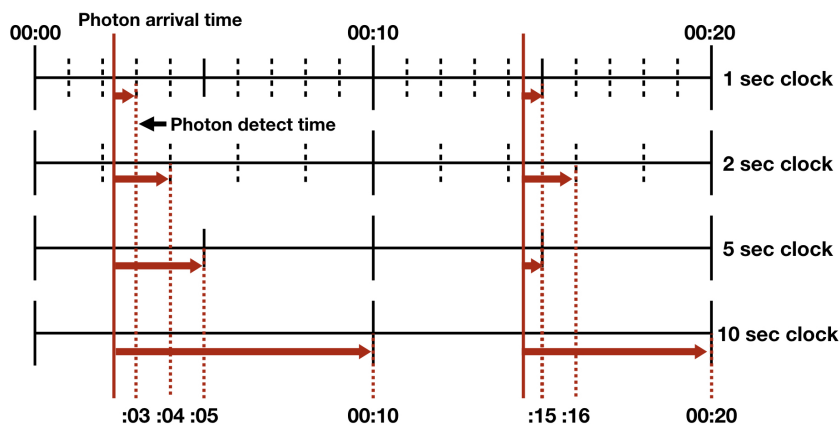


図 4.3: 時間分解能の落とし方のイメージ

4.2.2 検証結果

各検出器で時間分解能を落とし、Gauss 関数で Fitting した結果を図 4.4、そこから求めたパルス幅と時間分解能の関係を図 4.5 に示す。また、時間分解能とパルス Peak 位置 (= 時刻決定値) の関係を図 4.6 に示す。ここで、図 4.5、図 4.6 の横軸は、各時間分解能に対するパルス周期の重みを考慮して、時間分解能をパルス周期でわった値となっている。

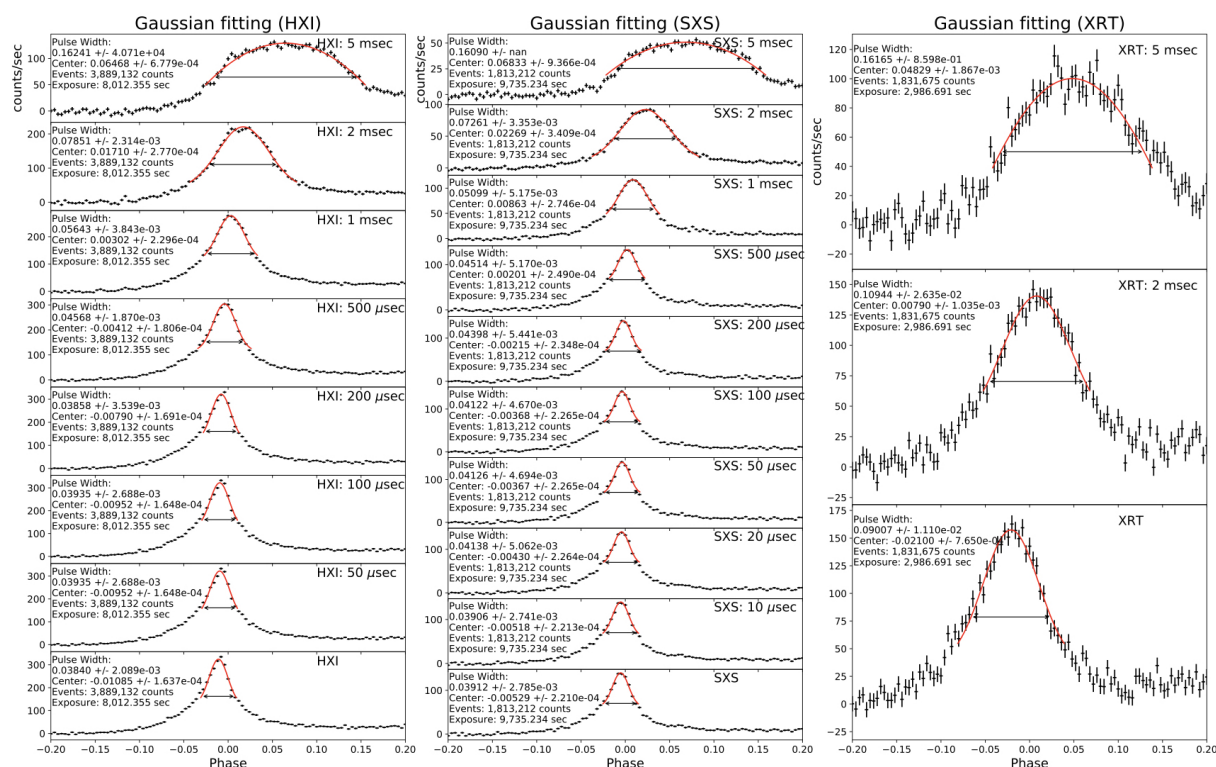


図 4.4: 時間分解能を落としての Gauss 関数 Fitting。左から、HXI (時間分解能: $25.6 \mu\text{sec}$)、SXS ($5 \mu\text{sec}$)、XRT (1.8 msec) で、各検出機が一番下の段は最小時間分解能 = 時間分解能を落とさない状態の Fitting 結果。

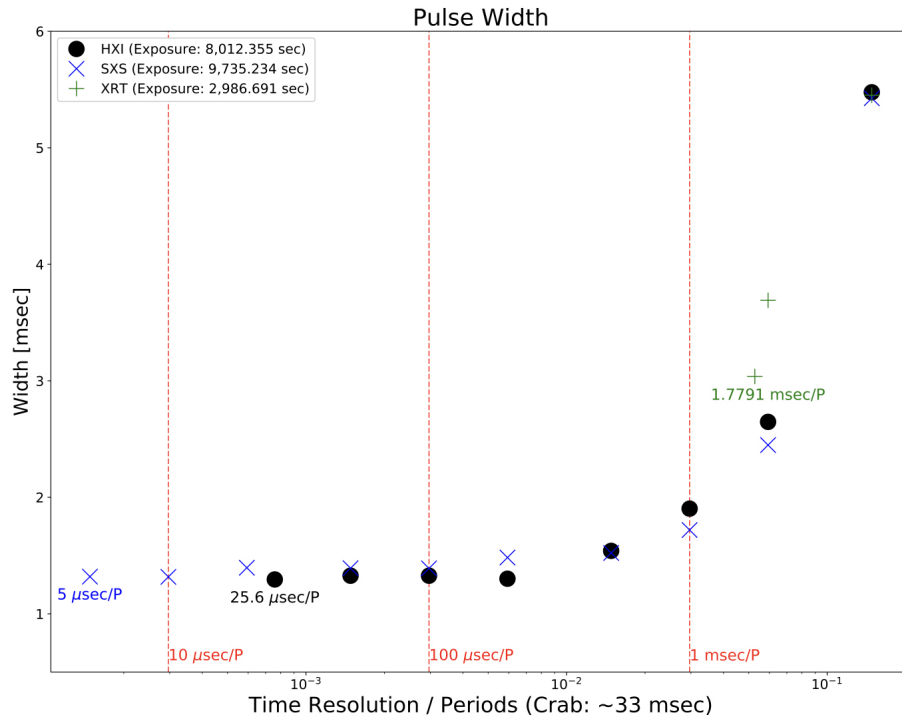


図 4.5: パルス幅と時間分解能の関係。横軸は、時間分解能に対するパルスの周期の重みを考慮して、時間分解能 / パルス周期 (= Crab パルサーの周期: 33 msec) で示している。黒: HXI, 青: SXS, 緑: XRT

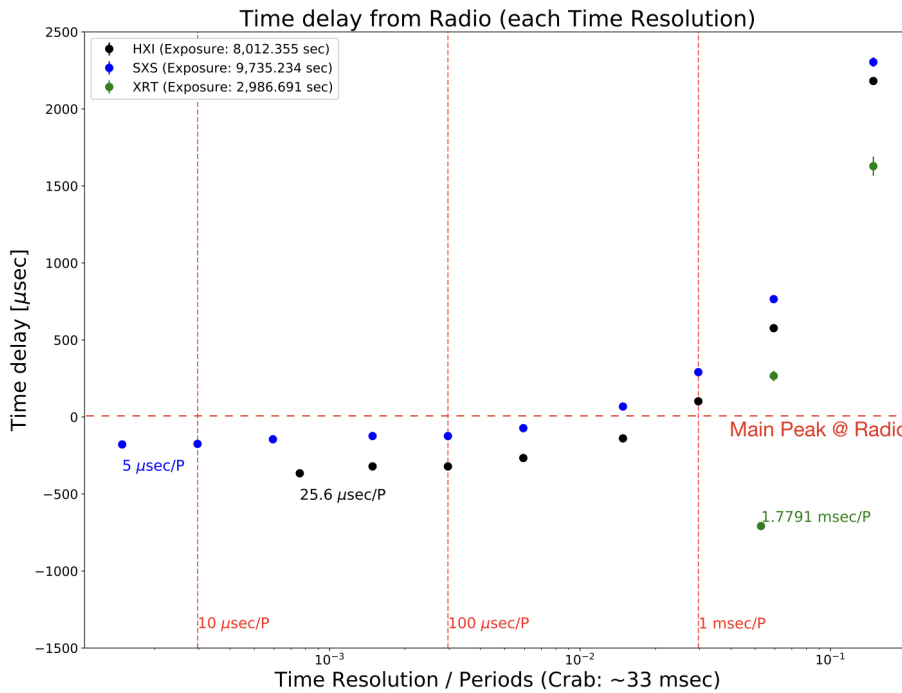


図 4.6: 時間分解能とパルス Peak 位置の関係。縦軸の原点 (赤破線) は 4.1 節同様、絶対時刻の基準点である電波観測での Peak 位置を表す。黒: HXI, 青: SXS, 緑: XRT

4.2.3 考察

図 4.5 より、時間分解能が良くなるほどパルスの幅が指数関数的に狭くなっている。特に、同エネルギー帯域を感度を持つ SXS (時間分解能: $5\ \mu\text{sec}$) と XRT (時間分解能: $1.7791\ \text{msec}$ @ WT) で比べてみると、SXS で約 3 倍パルス幅が細くなっていることが分かる。また、SXS、HXI とともに時間分解能が $200\ \mu\text{sec}$ より小さい場合、検出されるパルス幅はほとんど変化していない。これより、Crab パルサー (周期: $33\ \text{msec}$) 程度の時間変動天体を十分に観測するためには、検出器に 約 $200\ \mu\text{sec}$ の時間分解能が必要だと分かる。

図 4.6 では、検出器の時間分解能が悪くなると、パルスのピーク位置が遅れる方向にシフトし、予想通り時刻決定値が遅れていくことが分かる。さらに、SXS、HXI の結果に注目すると、 $200\ \mu\text{sec}$ 辺りを境に、それより時間分解能が悪いとパルス到来時刻が大きく遅れていく。従って、Crab パルサーのパルス到来時刻を正確に見積もるためには、約 $200\ \mu\text{sec}$ 以上の時間分解能が必要だと分かる。

第 5 章 Crab パルサーの Pulse 特性解析

5.1 Main・Inter Pulse 強度解析

Crab パルサーからのパルス放射は Main・Inter Pulse の 2 種類であるが、Main Pulse と Inter Pulse は、パルサーの異なる磁極から放射されると考えられている。それぞれの放射は、1.2.2 節 で述べたように、電波帯域は極付近で、X 線・ γ 線帯域は極から離れた磁気圏から放射される。ここで、Jain & Paul (2011) [41] では X 線帯域でそれぞれのパルスの強度比がエネルギー依存性をもつと示唆されているが、2 - 20 keV, 30 - 100 keV の 2 つの帯域だけでしか確認されておらず、定量的で詳細な解析は未だなされていない。

そこで本研究では、ひとみ、Swift 衛星での Crab パルサーの観測結果を用いて Main・Inter Pulse の強度比を求める。このとき、観測結果を細かいエネルギー帯域で分割し、パルス強度比のエネルギー依存性を先行研究よりも詳細解析し、強度比のエネルギー依存性の定量化を行う。

5.1.1 解析方法

Main・Inter のパルス強度比は、畳み込みライトカーブを各エネルギー帯域ごとに用意し、Pulse Profile を模した関数と相互相関させて求める。相互相関とは、2 つの関数を掛け合わせて、それぞれの関数の相関具合を評価する方法である。このとき、相関値はパルスの強度に比例するので、Main・Inter 両パルスの相関値からそれぞれのパルスの強度を見積もる。

基準関数の導出

まず、畳み込みライトカーブと相関をとるための、基準となる関数を導出する。基準の関数は図 3.4 で求めた各検出器の畳み込みライトカーブを、表 5.1 の条件で関数化して使用する。

表 5.1: 畳み込みライトカーブの関数化条件

Phase	$Y(X: \text{Phase})$
-0.5 - -0.2	$Y = 0$
-0.2 - 0.1	$Y = aX + b$ (直線接続) ^{*a}
0.1 - 0.2	$Y = \text{Average (0.1 - 0.2 Phase)}$
0.2 - 0.5	$Y = aX + b$ (直線接続)

^{*a} $(X1, Y1) \rightarrow (X2, Y2)$ へ変動する場合、その間の傾き (a) と切片 (b) を求め、直線で接続する

相関方法と強度判定

細かくエネルギー帯域で分割した畳み込みライトカーブに対し、基準関数と相関をとる。相関強度は、”基準関数 × 各エネルギー帯域の畳み込みライトカーブ”の結果に対し、Main Pulse の区間 (−0.1 - 0.1 Phase) の合計値、Inter Pulse の区間 (0.3 - 0.5 Phase 間の合計値) を求める。(図 5.1) これらの合計値は、各エネルギー帯域の畳み込みライトカーブにおける、それぞれのパルスの強度に比例した値となる。従って、本研究ではこれらの合計値そのまま Main・Inter パルス強度と定義する。

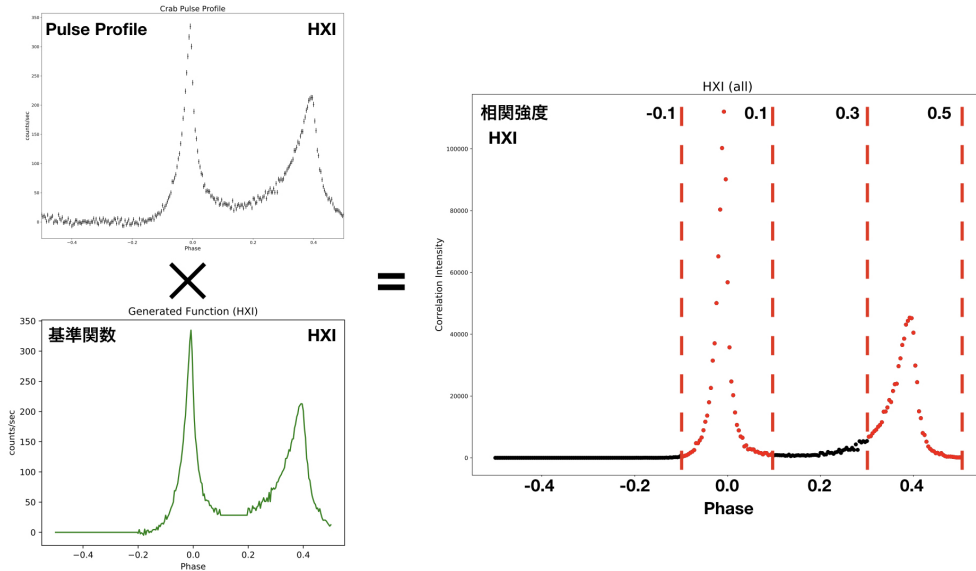


図 5.1: パルスの強度判定の仕方。対象とする Pulse Profile の各ビンと基準関数をかけ合わせ、相関強度を求める。その後、−0.1 - 0.1 Phase 間の相関強度の合計値を Main Pulse 強度、0.3 - 0.5 Phase 間の合計値を Inter Pulse 強度と定義する。

5.1.2 解析結果

基準関数との相互相関により、Main と Inter パルスの強度を求め、その結果の比をとることで各エネルギーごとのパルス強度比を導出した。その結果を、図 5.2 に示す。図 5.2 より、先行研究 (Jain & Paul (2011) [41]) の RXTE では 2 点 (2 - 20, 30 - 100 keV) のみの結果だったが、本研究にてひとみ + Swift 衛星の結果を加えることで、明らかに詳細なエネルギー依存性を確認することができた。また、本研究の結果をエネルギーの冪乗で Fitting すると、 $1.821 \pm 0.008 E^{-0.38 \pm 0.02}$ という結果が得られた。

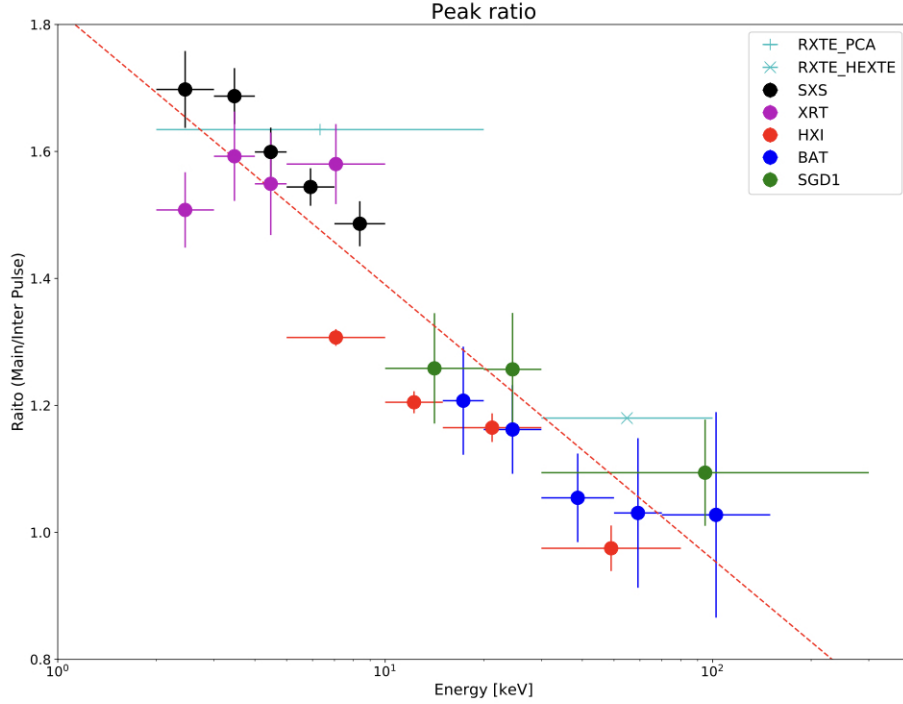


図 5.2: Crab パルサーの Main と Inter のパルス強度比。先行研究である RXTE (Jain & Paul (2011) [41]: 水色) に加え、本研究で得られたひとみ + Swift 衛星の結果を示している。赤破線は、本研究で得られたデータをエネルギー (E) のべき乗で Fitting した結果で、 $1.821 \pm 0.008 E^{-0.38 \pm 0.02}$ となった。

5.1.3 考察

図 5.2 から分かるとおり、本研究にて Main Pulse と Inter Pulse の強度比をより詳細に解析することで、その冪型のエネルギー依存性を定量化することができた (冪: -0.38 ± 0.02)。これにより、先行研究 (Jain & Paul (2011) [41]) の傾向どおり、Main パルス成分は Inter パルス成分よりもエネルギースペクトルがソフトであると言える。

この結果から、Inter パルスのみ、低エネルギー側の光子が何らかの原因で観測者から見えにくくなっていると分かる。この原因一つとして、パルサーの異なる磁極からの磁気圏放射であること、そして、その放射領域が光子のエネルギー帯域によって異なることが起因していると考えられる。Crab パルサーからの Main と Inter パルスは異なる磁極からの磁気圏放射とされているが、パルサーの回転軸 (磁気軸) と観測者の位置関係によっては、観測者から見える放射領域の大きさがそれぞれの磁極で異なる。これに加え、パルサー磁気圏からの放射では 1.2.2 節 で述べたように、光子のエネルギー帯域毎に放射領域が異なり、磁気圏の外側に行くほど高エネルギーな光子が放射される。そのため、観測者がパルサーを見込む角度によっては、片側の磁極で内側の磁気圏放射、つまり低エネルギー側の放射領域が見えにくくなる可能性がある。この他の原因として、Hasinger et al. (1984) [32] では低エネルギー側の X 線放射を隠すような存在も議論されている。

今回の結果は、そもそも一般的な回転駆動型パルサーの性質なのか、それとも Crab パルサーだけの現象なのかを明らかにする必要がある。そのため、Crab のような Main と Inter パルスが明るい同様な回転駆動型パルサーでの観測が望まれる。

5.2 Giant Radio Pulse 解析

1.4.2 節 で述べたように、Crab パルサーでは長年 GRP が多く観測されているが、未だ完全な理解には至っていない。GRP のさらなる理解を進めるために、近年では Crab パルサーが多波長で明るいことを利用して、GRP 放射時の多波長帯域の放射についても研究が行われている。そこで本研究では、電波帯域と X 線帯域で同時観測を行い、GRP 放射時の X 線帯域の放射について調べる。

5.2.1 GRP イベントの決定

GRP の決定は、ひとみ、Swift 衛星と同時観測を行った鹿島電波望遠鏡と IPRT で行う。GRP の判定はパルスの S/N (シグナル/ノイズ) 比で行い、ノイズレベルよりも 5.5 倍 (放射強度が約 $2.2 \text{ kJy } \mu\text{sec}$) 以上のパルスシグナルを GRP と定義する。今回の電波観測で検出した全 GRP を図 5.3 に示す。ここで、 $-0.0167 < \text{Phase} < 0.0167$ の GRP を Main Pulse GRP (MP-GRP)、 $0.3889 < \text{Phase} < 0.4222$ の GRP を Inter Pulse GRP (IP-GRP) とする。

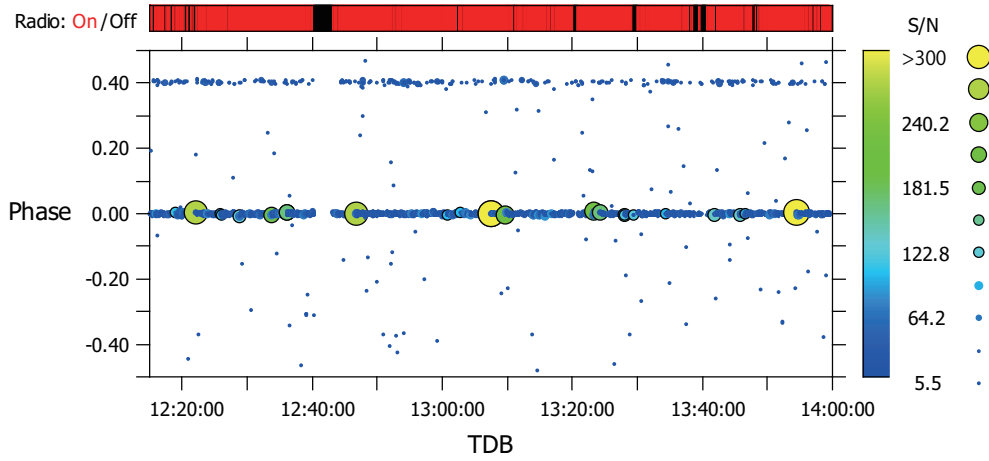


図 5.3: 電波観測による Crab パルサーからの GRP selection [36]

5.2.2 解析方法

電波観測時間帯との整合

電波帯域で観測している時間帯以外でも、GRP は発生している。そのため、確実に GRP が発生していない時間帯を切り出すために、X 線観測の時間帯を電波観測と合わせる必要がある。そこで、本研究で用いる X 線観測データは、図 3.2 のうち電波と同時観測している赤で示した時間帯のみを使用する。

GRP イベントの切り出し

電波で観測した GRP の時刻情報を元に X 線イベントの切り出しを行う。切り出しは Crab パルサーの周期間隔で行い、GRP 発生時刻前後約 17 msec の期間を GRP cycle として切り出す。また、今回は GRP 前後の変動を見るために、GRP cycle の前後 14 cycle までを切り出す。切り出したイベントを X 線観測での ON-GRP イベントとし、逆に切り出して残ったイベントを OFF-GRP イベントとする。このイベントの切り出しは Main Pulse、Inter Pulse 別々に行う。

cycle 毎に畳み込み

切り出した ON-GRP イベントは、1 cycle 毎に畳み込みを行う。その結果できた GRP cycle + 前後 14 cycle の畳み込みライトカーブを、GRP 発生時を 0 Phase とし、 ± 14.5 Phase まで Phase を振り直して畳み込みライトカーブを結合する。

5.2.3 解析結果

ON-GRP を赤、OFF-GRP を青の Pulse Profile として両者の比較を行う。また、GRP cycle 時の増光具合を確認するため、各 cycle で ("ON-GRP" - "OFF-GRP") のカウント数をグラフ下段に表示している。各検出器及び全検出器の結果を足し合わせた、Main・Inter Pulse GRP の Pulse Profile を図 5.4、5.5 に示す。また、GRP 発生の前後 1 cycle まで示した GRP Pulse Profile を図 5.6、5.7 に示す。ここで、GRP イベントのセレクションにより光子統計が下がっているため、また 4.1 節で評価した検出器間の絶対時刻差を考慮するため、畳み込みライトカーブを 1 bin サイズを、 $1/5$ (0.2000)、 $1/11$ (0.0909)、 $1/31$ (0.0323)、 $1/63$ (0.0159) Phase としてビンまとめしている。(検出器間の絶対時刻差はひとみ/SXS と Swift/XRT で最大 500 μ sec 近くあるため、 $0.5 \text{ msec}/0.33 \text{ msec} = 0.015$ Phase より大きな幅でビンまとめすれば良い) 図 5.4、5.5、5.6、5.7 では、 $1/31$ Phase ビンの結果のみを示す。

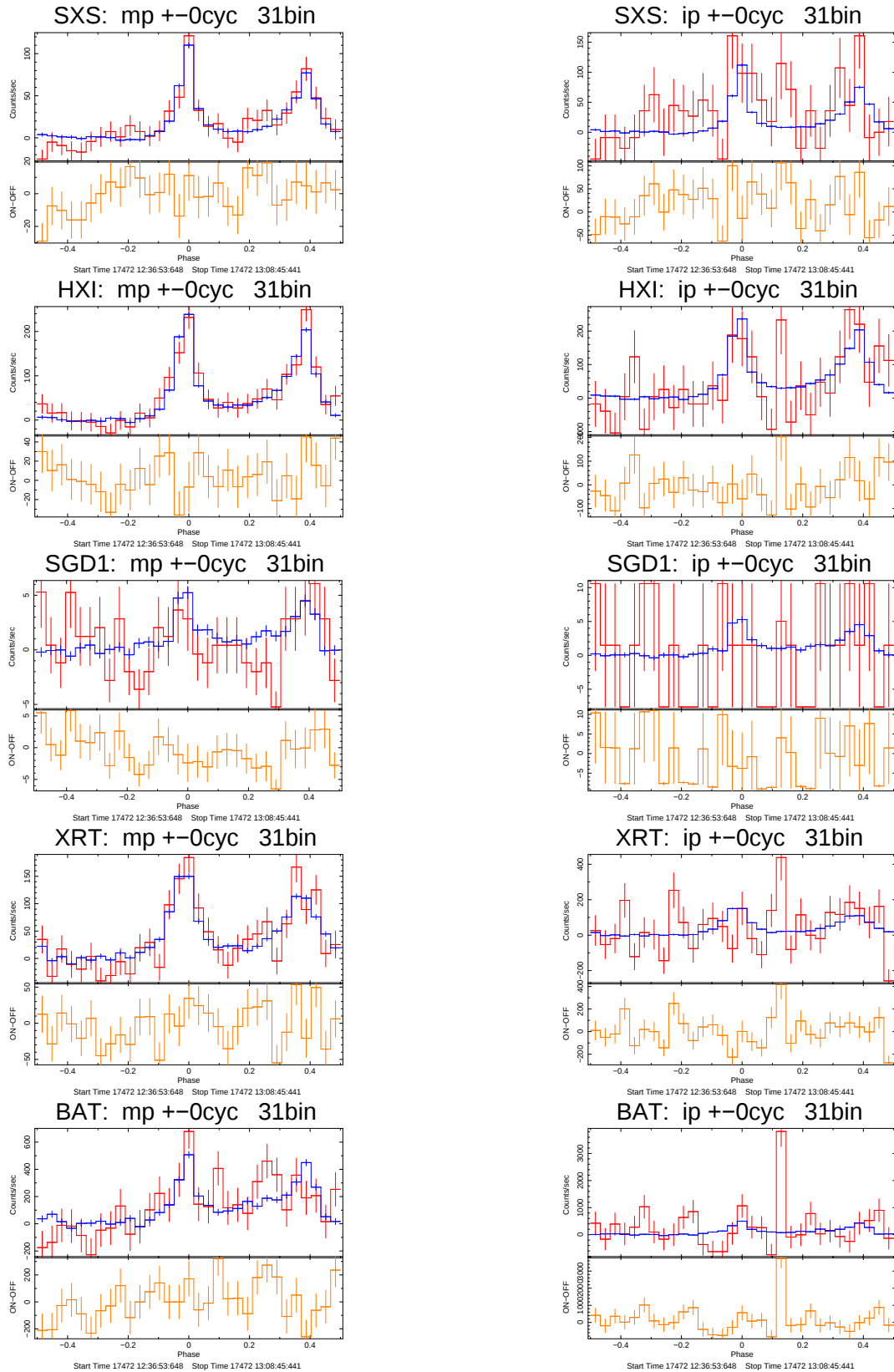


図 5.4: GRP 発生 cycle の各検出器の畳み込みライトカーブ。赤: ON-GRP cycle、青: OFF-GRP cycle の平均波形。左: MP-GRP, 右: IP-GRP の結果。Pulse Profile の下段 (橙色) は ON-GRP – OFF-GRP を示している。上から順に、ひとみ: SXS, HXI, SGD1, Swift: XRT, BAT

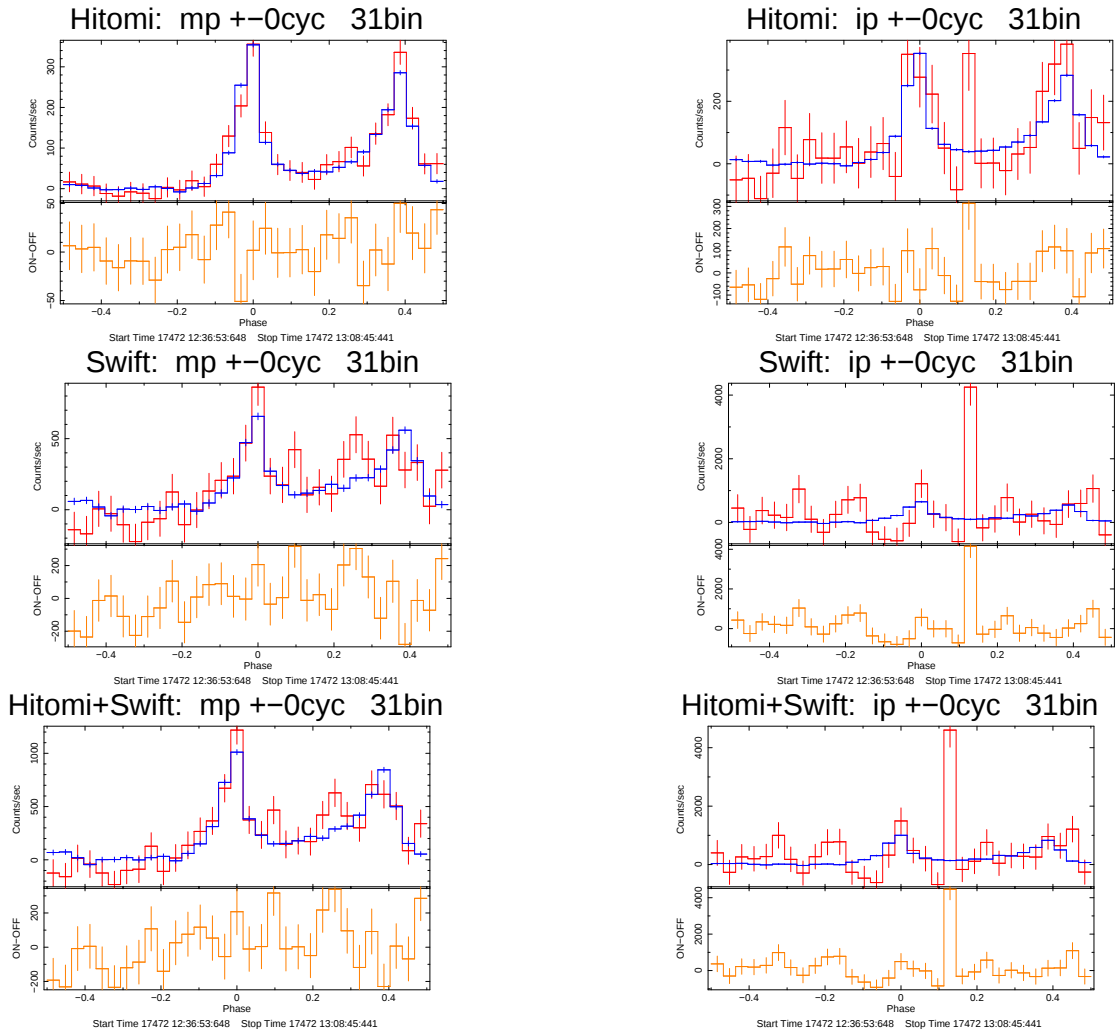


図 5.5: 検出器を足し合わせた GRP 畳み込みライトカーブ。赤: ON-GRP cycle、青: OFF-GRP cycle の平均波形。左: MP-GRP, 右: IP-GRP の結果。Pulse Profile の下段 (橙色) は ON-GRP - OFF-GRP を示している。上から順に、ひとみ: SXS + HXI + SGD1, Swift: XRT + BAT, ひとみ + Swift 全検出器を足し合わせた結果

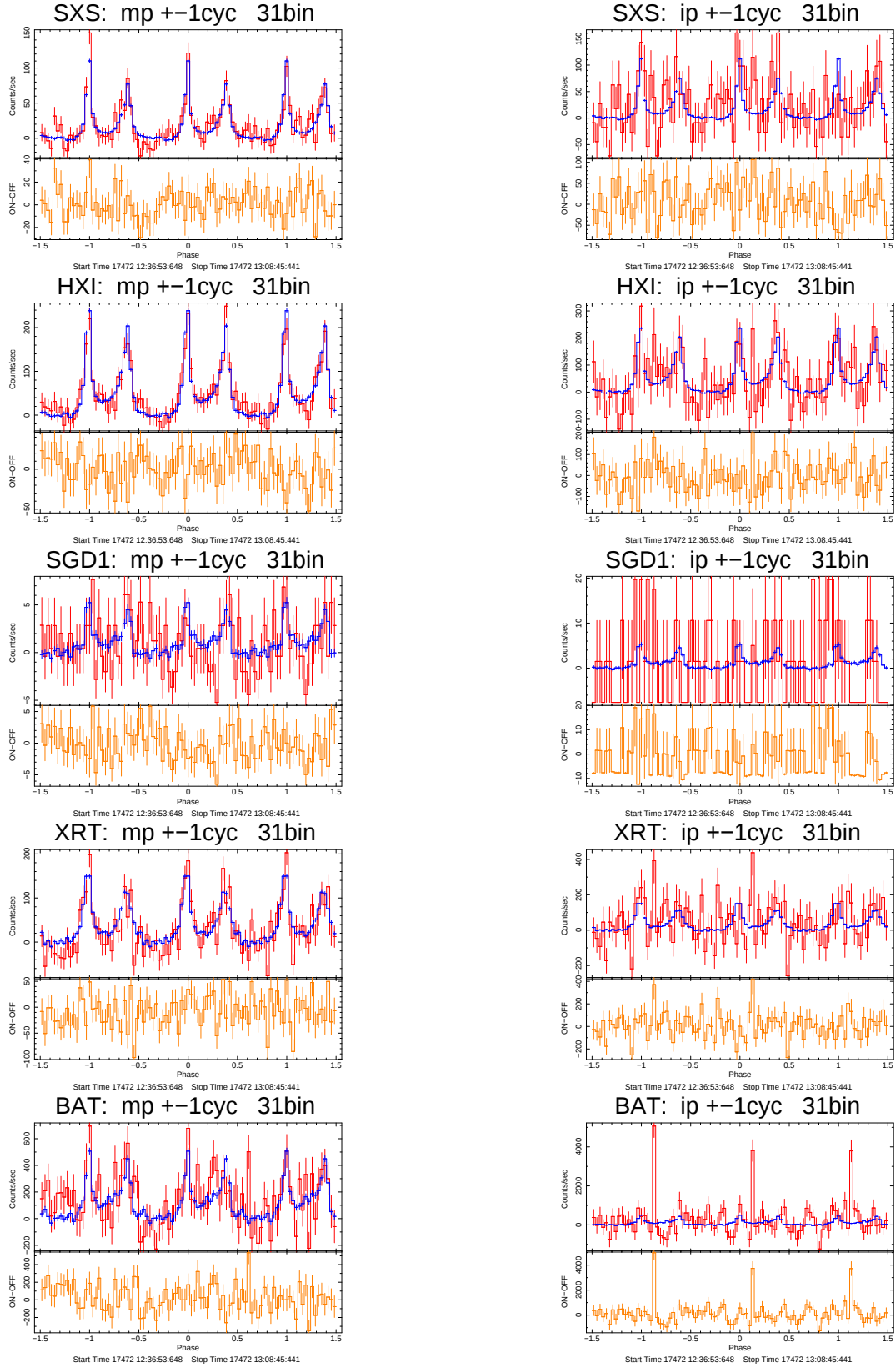


図 5.6: GRP 発生 cycle の各検出器の畳み込みライトカーブ (3 cycle)。赤: ON-GRP ± 1 cycle、青: OFF-GRP cycle の平均波形。上から順に、ひとみ: SXS, HXI, SGD1, Swift: XRT, BAT

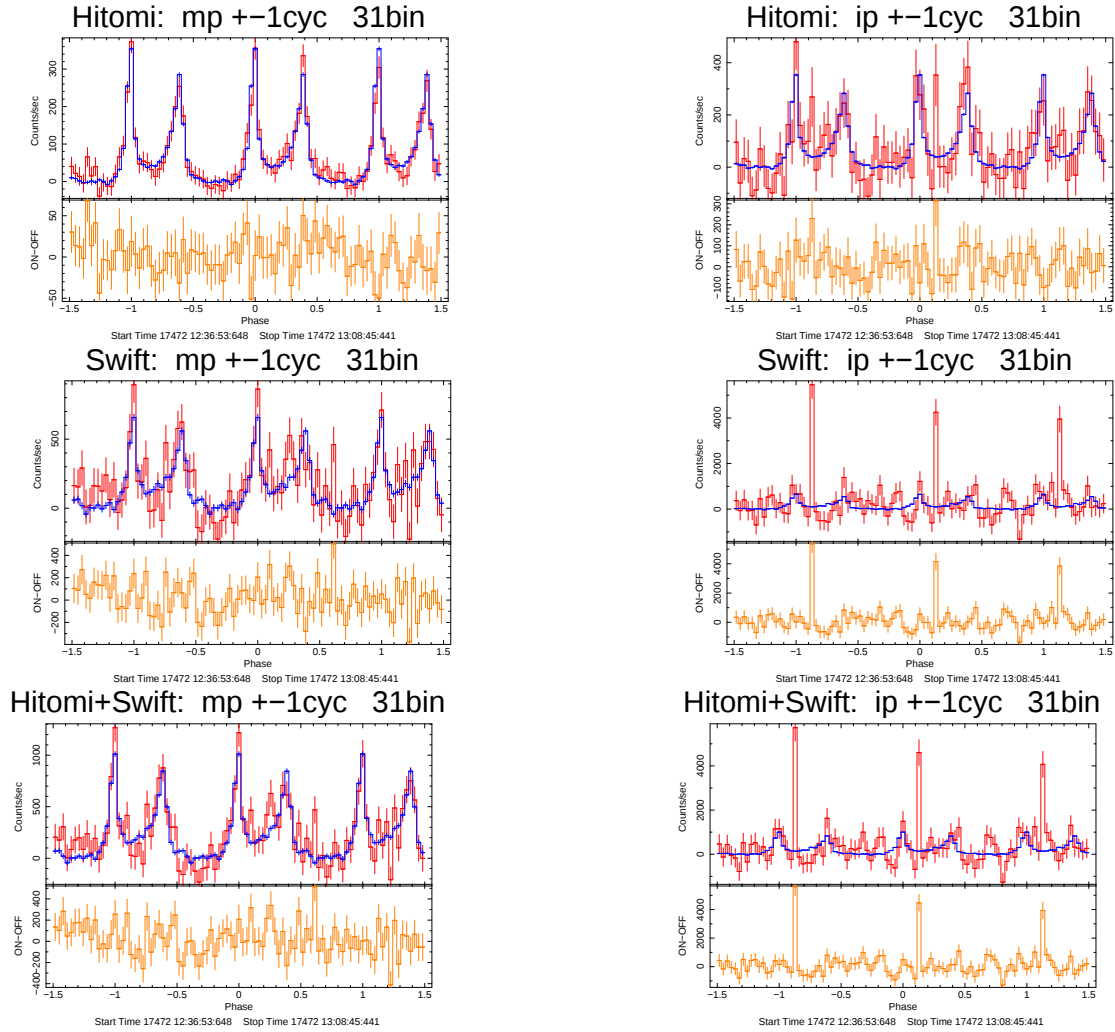


図 5.7: 検出器を足し合わせた GRP 畳み込みライトカーブ (3 cycle)。赤: ON-GRP ± 1 cycle、青: OFF-GRP cycle の平均波形。上から順に、ひとみ: SXS + HXI + SGD1, Swift: XRT + BAT, ひとみ + Swift 全検出器を足し合わせた結果

5.2.4 X 線帯域増光の上限値

GRP 発生 cycle とその ± 14 cycle で、OFF-GRP に対する ON-GRP の Main、Inter Pulse の増光率 (式 5.1) を各 Phase 毎に導出した。その結果を図 5.8、5.9、5.10 に示し、表 5.2 に GRP cycle での Main、Inter Pulse の増光率をまとめた結果を示す。このとき、ON-GRP イベントの光子統計に対する不定性を示す線として、 1σ の位置を青線、 2σ の位置を水色線で表している。同様に、今回用いた ON-GRP データから 3σ の位置を求め、それを X 線増光の上限値とした。その結果を表 5.3 に示す。

$$\text{Enhancement} = \frac{\text{ON-GRP} - \text{OFF-GRP}}{\text{OFF-GRP}} \times 100 \quad [\%] \quad (5.1)$$

表 5.2: GRP 発生時の X 線増光率

	0.0159 phase		0.0323 phase		0.0909 phase		0.2000 phase	
	MP	IP	MP	IP	MP	IP	MP	IP
ひとみ/SXS	-10.3 %	-61.5 %	-7.5 %	32.1 %	-10.6 %	-41.2 %	-10.3 %	-94.1 %
ひとみ/HXI	-6.3 %	-31.1 %	8.1 %	-9.7 %	6.6 %	22.4 %	-0.01 %	33.0 %
ひとみ/SGD1	-101.7 %	-206.5 %	-44.7 %	50.2 %	12.0 %	-78.1 %	12.0 %	50.3 %
Swift/XRT	9.1 %	16.1 %	-5.4 %	-21.9 %	-23.2 %	10.6 %	-14.3 %	64.9 %
Swift/BAT	59.4 %	72.5 %	14.2 %	35.2 %	1.1 %	84.0 %	20.4 %	-39.4 %
ひとみ	-8.3 %	-40.5 %	3.4 %	1.8 %	2.0 %	4.8 %	-2.7 %	-0.2 %
Swift	45.2 %	57.6 %	8.7 %	20.1 %	-5.8 %	64.5 %	10.6 %	-11.7 %
ALL	27.5 %	23.9 %	6.9 %	13.8 %	-3.2 %	44.1 %	6.2 %	-7.8 %

表 5.3: X 線増光率の上限値

	0.0159 phase		0.0323 phase		0.0909 phase		0.2000 phase	
	MP	IP	MP	IP	MP	IP	MP	IP
ひとみ/SXS	< 39.5 %	< 137.7 %	< 39.6 %	< 149.6 %	< 39.5 %	< 140.4 %	< 39.5 %	< 133.3 %
ひとみ/HXI	< 26.8 %	< 90.9 %	< 27.2 %	< 92.8 %	< 27.2 %	< 95.5 %	< 27.0 %	< 96.4 %
ひとみ/SGD1	< 163.9 %	< 545.3 %	< 178.2 %	< 770.7 %	< 191.2 %	< 667.6 %	< 191.2 %	< 770.7 %
Swift/XRT	< 38.9 %	< 156.3 %	< 38.5 %	< 153.3 %	< 38.1 %	< 155.9 %	< 38.3 %	< 160.1 %
Swift/BAT	< 73.1 %	< 263.7 %	< 72.7 %	< 262.7 %	< 72.5 %	< 263.9 %	< 72.6 %	< 260.9 %
ひとみ	< 22.1 %	< 75.6 %	< 22.4 %	< 78.5 %	< 22.4 %	< 79.0 %	< 22.3 %	< 78.8 %
Swift	< 53.5 %	< 198.1 %	< 53.2 %	< 197.2 %	< 53.1 %	< 198.2 %	< 53.2 %	< 196.3 %
ALL	< 36.6 %	< 132.7 %	< 36.4 %	< 132.3 %	< 36.3 %	< 133.0 %	< 36.4 %	< 131.8 %

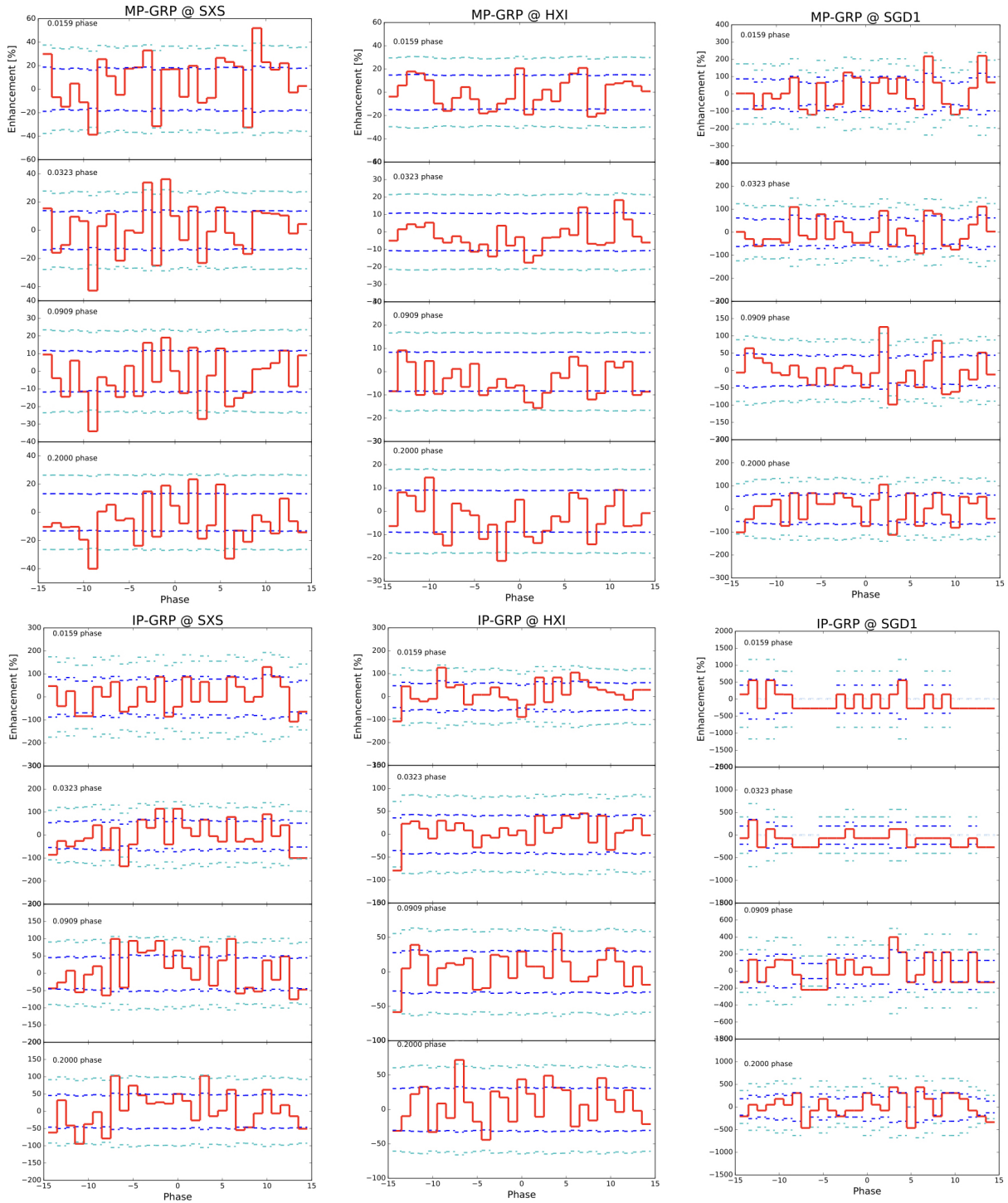


図 5.8: 各 cycle での増光率 (ひとみ検出器)。上段: MP-GRP, 下段: IP-GRP で、上から順に 0.0159, 0.0323, 0.0909, 0.2000 Phase ビンを示している。青: 1σ , 水色: 2σ の線

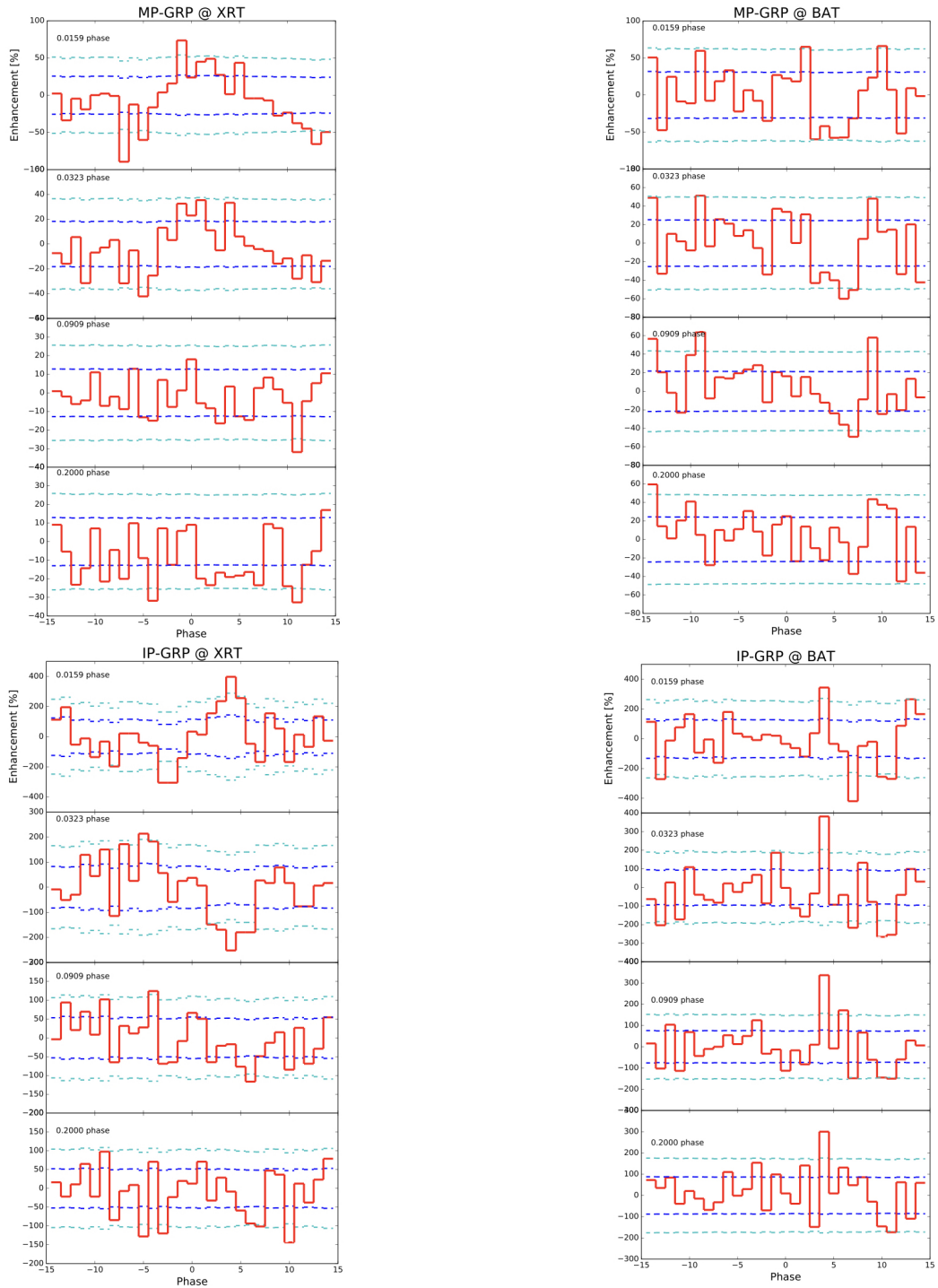


図 5.9: 各 cycle での増光率 (Swift 検出器)。上段: MP-GRP, 下段: IP-GRP で、上から順に 0.0159, 0.0323, 0.0909, 0.2000 Phase ビンを示している。青: 1σ , 水色: 2σ の線

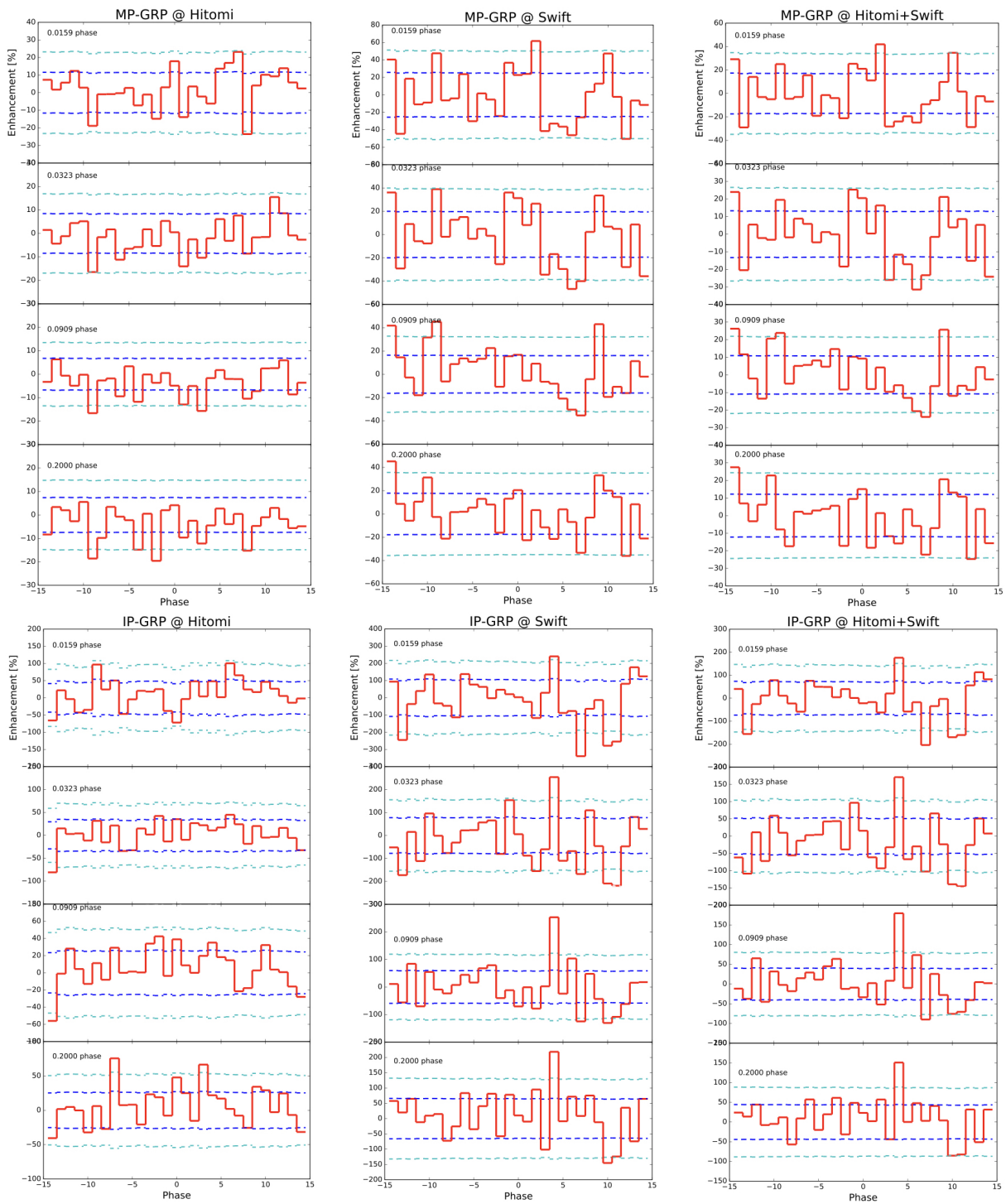


図 5.10: 各 cycle での増光率 (ひとみ + Swift)

5.2.5 考察

本研究では、GRP が発生したパルサー周期における X 線帯域での増光を調査した。その結果、Main・Inter パルスともに 3σ を超えるような有意な増光は見られず、Pulse Profile を見てもパルスの顕著な乱れも観測されなかった。また、GRP 前後 ± 14 cycle まで X 線帯域での変動を見てみたが、図 5.10 では IP-GRP 後 4 cycle 目でのみ 3σ を超えるような増光が確認できた。ここで全検出器、特に Swift 衛星での Pulse Profile では、IP-GRP cycle の 0.13 - 0.14 Phase 付近に顕著な増光が見て取れる。(前後 cycle も同様) しかし、この変動はビンまよりのサイズによって見え方が大きく変わっている。(付録 D) そのため、この変動を詳細に見るためには、より細かいビンでまとめて見てみる必要があるが、今回の同時観測で得られた IP-GRP の光子統計数及び観測時間 (exposure) 的に厳しいため、本議論からは除外する。

Crab パルサーからのパルス放射は、周囲の磁気圏からの電磁放射だと考えられるが、1.2.2 節 で述べたように、電波と X 線帯域ではその放射領域は異なる。今回の結果では、電波帯域で強く増光 = 放射しているにも関わらず、X 線帯域では有意な増光やパルスの乱れは見られなかった。つまり、GRP は電波放射領域であるパルサーの極付近で発生しながら、X 線放射領域である磁気圏の外側までは強く影響を及ぼしていないことになる。また、その変動が非常に短い時間で完結していることが先行研究などで分かっている。[31] 以上のことを踏まえると、GRP 放射では磁気圏全体の構造は変えずに、短時間でシンクロトロン放射をする粒子数を一時的に増加させる等、電波領域での局所的な現象であることが示唆される。

しかし、今回求めた上限値は統計的に緩い値であるため、エネルギー収支として見えていない可能性も考慮する必要がある。今回用いた電波観測での GRP 検出器の閾値は、5.2.1 節 で述べたように > 2.2 kJy μ sec としたので、これを Flux に換算すると約 2.2×10^{-17} erg/cm² となる。ここで、積分時間は 10 μ sec とし、Mikami et al. (2016) [65] と同様に GRP のパルス放射が電波帯域で 1 GHz 幅であることを仮定している。これに対し、X 線の定常 Flux は Main Pulse で 3.3×10^{-12} erg/cm² (2 - 300 keV, 0.03 Phase 幅) [36]。つまり、GRP 時の X 線 Flux の増光は 10 μ sec の積分時間で定常放射の 0.02 % 程度と見積もられるため、本研究で求めた GRP 時の X 線増光の上限値は統計的にかなり緩い値である。

以上のことを踏まえると、より詳細な解析をするには光子統計を良くする必要があるため、将来の大有効面積の検出器が期待される。また、先行研究である Hitomi Collaboration et al. (2017) [36] に対し光子統計を増やすため、本研究にて Swift 衛星の同時観測結果を加えたが、表 5.2 を見てもわかるように Swift 衛星の結果を足して求めた上限値はひとみ衛星単体のものより全体的に緩い制限となった。これは 4.2 節 で示したように、Crab パルサーに対して正確にパルスを検出するには Swift/XRT の時間分解能は十分では無いため (200 μ sec 必要なのに対し XRT は約 1.8 msec)、GRP 検出の時刻不定性が結果に反映している可能性が大きい。そのため、GRP という瞬間的なイベントを十分に観測するには、検出器の高時間分解能も必要になってくる。

第 6 章 結論

本研究では、ひとみ衛星と Swift 衛星、地上低周波電波望遠鏡を用いた Crab パルサーの同時観測を行い、(1)「ひとみ」の X 線観測の絶対時刻精度の検証と、(2) Crab パルサーの X 線パルス放射の特性について解析を行った。

(1) では、電波放射時刻を基準として、ひとみ衛星の絶対時刻精度を見積もった。その結果、ひとみ衛星内の検出器間で絶対時刻の決定値が最大で $187 \mu\text{sec}$ のずれがあり、特に SXS の系統誤差が大きいことが分かった。また、現在運用中の Swift 衛星検出器 BAT と比較して、時刻差が $54 \sim 125 \mu\text{sec}$ あることが分かった。さらに、他検出器の結果 (Molkov et al. (2010) [68]) とも比較した結果、SXS を除いて概ね先行研究どおりの傾向を示すことを確認した。これらの結果から、ひとみ衛星の絶対時刻精度目標値である $35 \mu\text{sec}$ 以上の誤差はあったが、性能要求値である $350 \mu\text{sec}$ 以内を満たしていることを確認した。また、特に系統誤差の大きかった SXS に関してさらなる時刻較正が必要であることがわかった。

上記に加え、時間分解能の違いによるパルス検出性能を調べるために、時間分解能ごとの時刻決定精度と検出されるパルス幅を求めた。その結果、Crab パルサーの検出には時刻決定精度・パルス幅の観点から $200 \mu\text{sec}$ 以上の時間分解能が必要であることを確認した。これらのことから、ひとみ衛星での Crab パルサーの観測は十分な感度で行えたと言える。

(2) では、Crab パルサーの X 線パルス放射の特性を理解するため、Main・Inter パルスの強度比について調べた。その結果、Main Pulse と Inter Pulse の強度比は、先行研究である Jain & Paul (2011) [41] も含め、エネルギーの冪型 (冪: -0.38 ± 0.02) で表すことができた。今回の結果は、一般的な回転駆動型パルサーの性質かどうかなど不明瞭な点も多いので、Crab パルサーに似た天体での観測が望まれる。

最後に、地上低周波電波望遠鏡との同時観測により、GRP 時の X 線帯域の放射特性について調べた。その結果、ひとみと Swift 衛星の全検出器で有意な増光は確認できず、観測帯域 ($2 - 300 \text{ keV}$) における MP-GRP・IP-GRP それぞれの増光率の上限値として 36.4% 、 131.8% という結果を得た。この結果から、GRP 放射は磁気圏全体を崩さず、局所的な放射を行う機構であることが示唆される。しかし、今回得られた上限値はかなり緩い値であるため、将来の大有効面積及び高時間分解能の検出器での観測が期待される。

関連図書

- [1] Abdo, A. A., Ackermann, M., Ajello, M., et al. 2010, *ApJ*, 708, 1254
- [2] Aharonian, F. A., Bogovalov, S. V., & Khangulyan, D. 2012, *Nature*, 482, 507
- [3] Aliu, E., Archambault, S., Arlen, T., et al. 2012, *ApJ*, 760, 136
- [4] Arons, J. 1983, *ApJ*, 266, 215
- [5] Baade, W., & Zwicky, F. 1934, *Proceedings of the National Academy of Science*, 20, 254
- [6] Backer, D. C. 1970, *Nature*, 228, 42
- [7] Backer, D. C., Kulkarni, S. R., Heiles, C., Davis, M. M., & Goss, W. M. 1982, *Nature*, 300, 615
- [8] Barthelmy, S. D., Barbier, L. M., Cummings, J. R., et al. 2005, *Space Sci. Rev.*, 120, 143
- [9] Bhat, N. D. R., Tingay, S. J., & Knight, H. S. 2008, *ApJ*, 676, 1200
- [10] Bhattacharya, D., & van den Heuvel, E. P. J. 1991, *Phys. Rep.*, 203, 1
- [11] Bilous, A. V., Kondratiev, V. I., McLaughlin, M. A., et al. 2011, *ApJ*, 728, 110
- [12] Bilous, A. V., McLaughlin, M. A., Kondratiev, V. I., & Ransom, S. M. 2012, *ApJ*, 749, 24
- [13] Bühler, R., & Blandford, R. 2014, *Reports on Progress in Physics*, 77, 066901
- [14] Burrows, D. N., Hill, J. E., Nousek, J. A., et al. 2005, *Space Sci. Rev.*, 120, 165
- [15] Camenzind, M. 2007, *Compact objects in astrophysics : white dwarfs, neutron stars, and black holes*
- [16] Chandrasekhar, S. 1931, *ApJ*, 74, 81
- [17] Cheng, K. S., Ho, C., & Ruderman, M. 1986, *ApJ*, 300, 500
- [18] Citterio, O., Campano, S., Conconi, P., et al. 1996, in *Proc. SPIE*, Vol. 2805, *Multilayer and Grazing Incidence X-Ray/EUV Optics III*, ed. R. B. Hoover & A. B. Walker, 56–65
- [19] Cognard, I., Shrauner, J. A., Taylor, J. H., & Thorsett, S. E. 1996, *ApJ*, 457, L81
- [20] Condon, J. J., & Ransom, S. M. 2016, *Essential Radio Astronomy*
- [21] Cropper, M., Zane, S., Ramsay, G., Haberl, F., & Motch, C. 2001, *A&A*, 365, L302
- [22] Cusumano, G., La Parola, V., Capalbi, M., et al. 2012, *A&A*, 548, A28

- [23] Demorest, P. B., Pennucci, T., Ransom, S. M., Roberts, M. S. E., & Hessels, J. W. T. 2010, *Nature*, 467, 1081
- [24] Downs, G. S. 1981, *ApJ*, 249, 687
- [25] Duncan, R. C., & Thompson, C. 1992, *ApJ*, 392, L9
- [26] Ershov, A. A., & Kuzmin, A. D. 2003, *Astronomy Letters*, 29, 91
- [27] Ershov, A. A., & Kuzmin, A. D. 2005, *A&A*, 443, 593
- [28] Fruchter, A. S., Stinebring, D. R., & Taylor, J. H. 1989, in *NATO Advanced Science Institutes (ASI) Series C*, Vol. 262, *NATO Advanced Science Institutes (ASI) Series C*, ed. H. Ögelman & E. P. J. van den Heuvel, 163
- [29] Gehrels, N., Chincarini, G., Giommi, P., et al. 2004, *ApJ*, 611, 1005
- [30] Gold, T. 1968, *Nature*, 218, 731
- [31] Hankins, T. H., Kern, J. S., Weatherall, J. C., & Eilek, J. A. 2003, *Nature*, 422, 141
- [32] Hasinger, G., Pietsch, W., Reppin, C., et al. 1984, *Advances in Space Research*, 3, 63
- [33] Hester, J. J., Mori, K., Burrows, D., et al. 2002, *ApJ*, 577, L49
- [34] Hewish, A., Bell, S. J., Pilkington, J. D. H., Scott, P. F., & Collins, R. A. 1968, *Nature*, 217, 709
- [35] Hitomi Collaboration, Aharonian, F., Akamatsu, H., et al. 2016, *Nature*, 535, 117
- [36] —. 2017, *ArXiv e-prints*, arXiv:1707.08801
- [37] Holland, A. D., Turner, M. J., Abbey, A. F., & Pool, P. J. 1996, in *Proc. SPIE*, Vol. 2808, *EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Instrumentation for Astronomy VII*, ed. O. H. Siegmund & M. A. Gummin, 414–420
- [38] Hubble, E. P. 1928, *Leaflet of the Astronomical Society of the Pacific*, 1, 55
- [39] IEEE Computer Society. 1996, *IEEE Std 1355-1995*, 5449182
- [40] in’t Zand, J. J. M. 1992, PhD thesis, Space Research Organization Netherlands, Sorbonnelaan 2, 3584 CA Utrecht, The Netherlands
- [41] Jain, C., & Paul, B. 2011, *Research in Astronomy and Astrophysics*, 11, 1134
- [42] Johnston, S., & Romani, R. W. 2003, *ApJ*, 590, L95
- [43] Joshi, B. C., Kramer, M., Lyne, A. G., McLaughlin, M. A., & Stairs, I. H. 2004, in *IAU Symposium*, Vol. 218, *Young Neutron Stars and Their Environments*, ed. F. Camilo & B. M. Gaensler, 319
- [44] Kazantsev, N. A., & Potapov, V. A. 2015, *Astronomicheskij Tsirkulyar*, 1628, 1
- [45] Kelley, R. L., Akamatsu, H., Azzarello, P., et al. 2016, in *Proc. SPIE*, Vol. 9905, *Space Telescopes and Instrumentation 2016: Ultraviolet to Gamma Ray*, 99050V

- [46] Knight, H. S., Bailes, M., Manchester, R. N., & Ord, S. M. 2005, *ApJ*, 625, 951
- [47] Kokubun, M., Makishima, K., Takahashi, T., et al. 2007, *PASJ*, 59, 53
- [48] Kokubun, M., Nakazawa, K., Enoto, T., et al. 2010, in *Proc. SPIE*, Vol. 7732, *Space Telescopes and Instrumentation 2010: Ultraviolet to Gamma Ray*, 773215
- [49] Kramer, M., Lyne, A. G., O’Brien, J. T., Jordan, C. A., & Lorimer, D. R. 2006, *Science*, 312, 549
- [50] Kuiper, L., Hermsen, W., Walter, R., & Foschini, L. 2003, *A&A*, 411, L31
- [51] Kuzmin, A. D., & Ershov, A. A. 2004, *A&A*, 427, 575
- [52] Kuzmin, A. D., & Ershov, A. A. 2006, *Astronomy Letters*, 32, 583
- [53] Kuzmin, A. D., Ershov, A. A., & Losovsky, B. Y. 2004, *Astronomy Letters*, 30, 247
- [54] Larmor, J. 1897, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 44, 503
- [55] Lattimer, J. M., & Prakash, M. 2001, *ApJ*, 550, 426
- [56] Lewin, W. H. G., van Paradijs, J., & Taam, R. E. 1993, *Space Sci. Rev.*, 62, 223
- [57] Lorimer, D. R., & Kramer, M. 2004, *Handbook of Pulsar Astronomy*
- [58] Lundgren, S. C., Cordes, J. M., Ulmer, M., et al. 1995, *ApJ*, 453, 433
- [59] Lyne, A. G., Pritchard, R. S., & Graham-Smith, F. 1993, *MNRAS*, 265, 1003
- [60] Malofeev, V. M., Teplykh, D. A., Malov, O. I., & Logvinenko, S. V. 2014, in *Astronomical Society of India Conference Series*, Vol. 13, *Astronomical Society of India Conference Series*, 69–72
- [61] Manchester, R. N., & Lyne, A. G. 1977, *MNRAS*, 181, 761
- [62] Massaro, E., Campana, R., Cusumano, G., & Mineo, T. 2006, *A&A*, 459, 859
- [63] McLaughlin, M. A., Lyne, A. G., Lorimer, D. R., et al. 2006, *Nature*, 439, 817
- [64] Mikami, R., Terasawa, T., Takefuji, K., et al. 2013, in *The Fast and the Furious: Energetic Phenomena in Isolated Neutron Stars, Pulsar Wind Nebulae and Supernova Remnants*, ed. J.-U. Ness, 58
- [65] Mikami, R., Asano, K., Tanaka, S. J., et al. 2016, *ApJ*, 832, 212
- [66] Mitsuda, K., Bautz, M., Inoue, H., et al. 2007, *PASJ*, 59, S1
- [67] Mitsuda, K., Kelley, R. L., Boyce, K. R., et al. 2010, in *Proc. SPIE*, Vol. 7732, *Space Telescopes and Instrumentation 2010: Ultraviolet to Gamma Ray*, 773211
- [68] Molkov, S., Jourdain, E., & Roques, J. P. 2010, *ApJ*, 708, 403
- [69] Nakazawa, K., Takahashi, T., Watanabe, S., et al. 2014, in *Proc. SPIE*, Vol. 9144, *Space Telescopes and Instrumentation 2014: Ultraviolet to Gamma Ray*, 91440J

- [70] Nakazawa, K., Sato, G., Kokubun, M., et al. 2016, in Proc. SPIE, Vol. 9905, Space Telescopes and Instrumentation 2016: Ultraviolet to Gamma Ray, 990511
- [71] Parkes, S., & McClements, C. 2005, in ESA Special Publication, Vol. 602, DASIA 2005 - Data Systems in Aerospace, 18.1
- [72] Patt, B. L., Ulmer, M. P., Zhang, W., Cordes, J. M., & Arzoumanian, Z. 1999, ApJ, 522, 440
- [73] Pines, D. 1980, Journal de Physique, 41, C2
- [74] Popov, M., Soglasnov, V., Kondratiev, V., et al. 2009, PASJ, 61, 1197
- [75] Ramanamurthy, P. V., & Thompson, D. J. 1998, ApJ, 496, 863
- [76] Romani, R. W., & Johnston, S. 2001, ApJ, 557, L93
- [77] Ruderman, M. A., & Sutherland, P. G. 1975, ApJ, 196, 51
- [78] Sato, G., Kokubun, M., Nakazawa, K., et al. 2014, in Proc. SPIE, Vol. 9144, Space Telescopes and Instrumentation 2014: Ultraviolet to Gamma Ray, 914427
- [79] Shapiro, S. L., & Teukolsky, S. A. 1983, Black holes, white dwarfs, and neutron stars: The physics of compact objects
- [80] Shearer, A., Stappers, B., O'Connor, P., et al. 2003, Science, 301, 493
- [81] Singal, A. K., & Vats, H. O. 2012, AJ, 144, 155
- [82] Staelin, D. H. 1970, Nature, 226, 69
- [83] Staelin, D. H., & Reifenstein, III, E. C. 1968, Science, 162, 1481
- [84] Strader, M. J., Johnson, M. D., Mazin, B. A., et al. 2013, ApJ, 779, L12
- [85] Tajima, H., Blandford, R., Enoto, T., et al. 2010, in Proc. SPIE, Vol. 7732, Space Telescopes and Instrumentation 2010: Ultraviolet to Gamma Ray, 773216
- [86] Takahashi, T., Mitsuda, K., Kelley, R., et al. 2012, in Proc. SPIE, Vol. 8443, Space Telescopes and Instrumentation 2012: Ultraviolet to Gamma Ray, 84431Z
- [87] Takahashi, T., Kokubun, M., Mitsuda, K., et al. 2016, in Proc. SPIE, Vol. 9905, Space Telescopes and Instrumentation 2016: Ultraviolet to Gamma Ray, 99050U
- [88] Takefuji, K., Terasawa, T., Kondo, T., et al. 2016, PASP, 128, 084502
- [89] Terada, Y., Yamaguchi, S., Sugimoto, S., et al. 2017, ArXiv e-prints, arXiv:1712.01484
- [90] Tsuchiya, F., Misawa, H., Imai, K., Morioka, A., & Kondo, T. 2010, Advances in Geosciences, Volume 19: Planetary Science (SE), 19, 601
- [91] Vivekanand, M. 2001, A&A, 373, 236
- [92] Watanabe, S., Tajima, H., Fukazawa, Y., et al. 2016, in Proc. SPIE, Vol. 9905, Space Telescopes and Instrumentation 2016: Ultraviolet to Gamma Ray, 990513

- [93] Young, M. D., Manchester, R. N., & Johnston, S. 1999, *Nature*, 400, 848
- [94] Zavlin, V. E., Pavlov, G. G., Sanwal, D., & Trümper, J. 2000, *ApJ*, 540, L25

付録 A パルサーの磁気双極子モデル

以下では簡単なパルサーの磁気双極子モデルについて考えていく。パルサーは真空中を一定の周期 P で回転し、回転軸に対し角度 α 方向を向く磁気双極子モーメント $\mathbf{m}$ を持っているとする (図 A.1)。ここで、回転は十分に遅いと仮定し、回転による非局面歪曲は無視できるものとする。まず Larmor の公式ⁱより、回転する電気双極子によって放射される単位時間あたりのエネルギーを考えると、式 A.1 のように与えられる。

$$\dot{E}_{\text{rad}} = \frac{2q^2\dot{v}^2}{3c^3} = \frac{2}{3} \frac{(q\ddot{r} \sin \alpha)^2}{c^3} = \frac{2}{3} \frac{(\ddot{p}_{\perp})^2}{c^3} \quad (\text{A.1})$$

このとき、 $p = qr$ は電気双極子モーメントで、 $p_{\perp} = p \sin \alpha$ は回転軸方向に対して垂直な成分とする。Larmor の公式は磁気双極子に対しても同様に言えるので、 $m_{\perp} = m \sin \alpha$ を磁気双極子モーメントの垂直成分として、エネルギー放射率は式 A.2 で与えられる。

$$\dot{E}_{\text{rad}} = \frac{2}{3} \frac{(\ddot{m}_{\perp})^2}{c^3} \quad (\text{A.2})$$

ここで、半径 R で表面磁場の強さが B の磁気球における磁気双極子モーメントの大きさは $m = BR^3$ であるから、角速度 $\Omega = 2\pi/P$ を考慮すると式 A.2 は式 A.3 のように書ける。

$$\dot{E}_{\text{rad}} = \frac{2}{3} \frac{m_{\perp}^2 \Omega^4}{c^3} = \frac{2}{3c^3} (BR^3 \sin \alpha)^2 \left(\frac{2\pi}{P} \right)^4 \quad (\text{A.3})$$

この電磁放射自体は周波数 ($\nu = P^{-1}$) が小さすぎるため、周囲の星雲や星間物質 (ISM) 中で伝搬されないが、星雲で吸収されエネルギーを蓄積する。

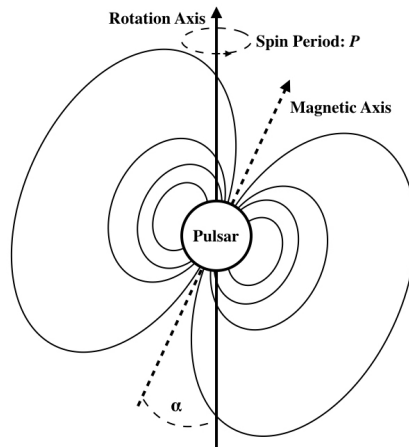


図 A.1: パルサーの磁気双極子モデル

ⁱ[54]

一方で、パルサーの慣性モーメントを I とすると、回転によるエネルギーは式 A.4 で与えられる。

$$E = \frac{I\Omega^2}{2} = \frac{2\pi^2 I}{P^2} \quad (\text{A.4})$$

このパルサーの回転エネルギーは磁気双極子放射のエネルギーとして消費されたとすると、パルサーは回転エネルギーを失う毎にスピンドウンするので、自転周期の変化率 $\dot{P}$ は正の値となる。このとき、回転エネルギーの損失率 $\dot{E}$ は式 A.5 のように書ける。

$$\dot{E} = \frac{dE}{dt} = I\Omega\dot{\Omega} = -\frac{4\pi^2 I\dot{P}}{P^3} \quad (\text{A.5})$$

回転エネルギーの損失率は磁気双極子放射での光度と等しいと考えられるので、 $\dot{E}$ は Spin-Down Luminosity と呼ばれる。

また、 $\dot{E}_{\text{rad}} = -\dot{E}$ の関係を用いると、パルサー表面磁場の下限値を求めることができる。式 A.3、A.5 より、磁場の下限値 B は式 A.6 のように与えられる。

$$B > B \sin \alpha = \left(\frac{3c^3 I}{8\pi^2 R^6} \right)^{1/2} (P\dot{P})^{1/2} \quad (\text{A.6})$$

さらに、 $B \sin \alpha$ が時間的に激しく変化しない場合、パルサーの原初の周期 P_0 が現在の周期よりもはるかに短いことを仮定することで、パルサーの特徴年齢 (Characteristic Age) を見積もることができる。式 A.6 より、 $P\dot{P}$ は式 A.7 のように書ける。

$$P\dot{P} = \frac{8\pi R^6 (B \sin \alpha)^2}{3c^3 I} \quad (\text{A.7})$$

式 A.7 より、 $P\dot{P}$ は時間変動しないことがわかる。従って、 $P\dot{P} = P\dot{P} \rightarrow PdP = P\dot{P}dt$ のように書き換え、 $0 \sim \tau$ (特徴年齢) で積分することで式 A.8 が与えられる。

$$\frac{P^2 - P_0^2}{2} = P\dot{P}\tau \quad (\text{A.8})$$

ここで、 $P_0^2 \ll P^2$ とすると、式 A.8 より式 A.9 が与えられる。

$$\tau \equiv \frac{P}{2\dot{P}} \quad (\text{A.9})$$

Braking Index

上記の磁気双極子モデルなど、 Ω と $\dot{\Omega}$ が冪乗の関係にある減速モデルは式 A.10 の形で書くことができる。

$$\dot{\Omega} = -(\text{const})\Omega^n \quad (\text{A.10})$$

このときの n を Braking Index と呼ぶ。特に、磁気双極子モデルでは $n = 3$ となる。Braking Index は式 A.10 を微分することで、 $n = -\Omega\ddot{\Omega}/\dot{\Omega}^2$ と求まる。これを P と $\dot{P}$ を用いて表すと式 A.11 のように書ける。

$$n = 2 - \frac{P\ddot{P}}{\dot{P}^2} \quad (\text{A.11})$$

Braking Index は $1.4 \leq n < 3$ で見られ、他のスピンドウン起源や特徴年齢などをより正確に求めるための手掛かりとなる。

付録 B Data Reduction の詳細

B.1 SGD: 光電吸収モードのセレクション条件

光電吸収モードは、SGD の Unscreened Event Data に対し、表 B.1 に示す条件全てを "AND" で掛ける。下記の条件に加え、Good Time Interval (GTI) 情報として SGD1: GTI でスクリーニングする。

表 B.1: 光電吸収モードのセレクション条件

	FLAG_LCHKMIO	==	b0	&&	FLAG_CCBUSY[1]	==	b0
&&	FLAG_CCBUSY[2]	==	b0	&&	FLAG_CCBUSY[3]	==	b0
&&	FLAG_HITPAT[1]	==	b0	&&	FLAG_HITPAT[2]	==	b0
&&	FLAG_HITPAT[3]	==	b0	&&	FLAG_HITPAT[4]	==	b0
&&	FLAG_FASTBGO[1]	==	b0	&&	FLAG_FASTBGO[2]	==	b0
&&	FLAG_FASTBGO[3]	==	b0	&&	FLAG_FASTBGO[4]	==	b0
&&	FLAG_SEU	==	b0	&&	FLAG_LCHK	==	b0
&&	FLAG_CALMODE	==	b0	&&	FLAG_TRIGPAT[29]	==	b0
&&	CATEGORY	==	85	&&	MATTYPE	==	1
&&	NUMSIGNAL	==	1				

B.2 XRT: 衛星の姿勢によるセレクション

図 B.1 は、Swift 衛星の視線方向をプロットしたもので、これにより衛星の姿勢を確認できる。ここで、縦軸と横軸は視線中心を Crab パルサーの位置 (RA: 83.633218、DEC: +22.014464) としたときの、中心からのずれを表している。XRT の観測期間を 4 つに分けたとき、図 B.1 より、XRT3 の期間 (15:19:58 - 15:37:18: 約 17 分間) だけ、他の期間よりも衛星の視線がずれていることが分かる。図 B.1 は各期間における XRT の Crab パルサーの Pulse Profile だが、XRT3 の期間のみ視線がずれているため、Crab のパルスが観測できていないことが分かる。

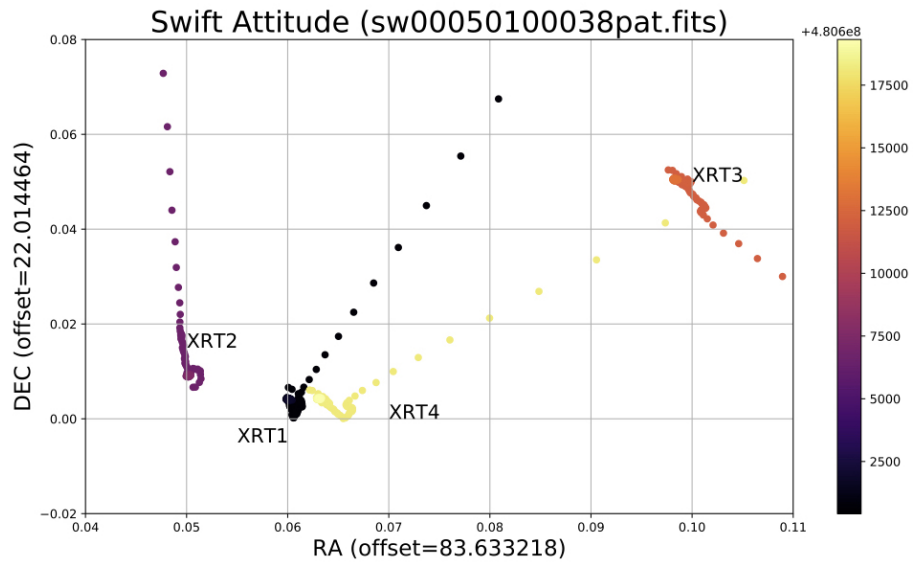


図 B.1: Swift 衛星の視線方向。カラーバーは経過時間を示す。

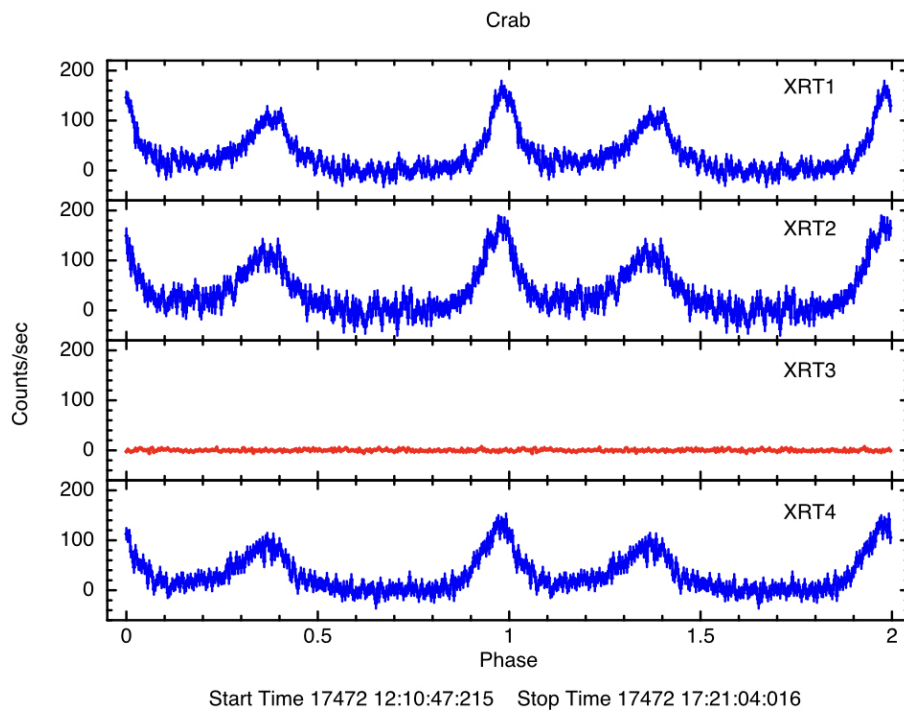


図 B.2: 各期間における XRT の Crab Pulse Profile

付録 C Fitting 関数

C.1 各種 Fitting 関数

本研究で用いた各種 Fitting 関数 (式 C.1、式 C.2、式 C.3) と、そのパラメータを以下に示す。

Gauss 関数

$$G(x) = A e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{C.1})$$

A : 振幅 x_0 : Peak 位置 σ : 標準偏差

Lorentz 関数

$$L(x) = \frac{A \gamma^2}{\gamma^2 + (x - x_0)^2} \quad (\text{C.2})$$

A : 振幅 x_0 : Peak 位置 γ : 半値全幅

Voigt 関数

$$V(x) = \int_{-\infty}^{\infty} G(x', \gamma_G) L(x', A_L, \gamma_L) dx' \quad (\text{C.3})$$

x_0 : Peak 位置 A_L : Lorentz 関数の振幅 γ_G, γ_L : Gauss, Lorentz 関数の半値全幅

C.2 畳み込みライトカーブの Fitting 結果

前節で紹介した関数を用いて、畳み込みライトカーブの Main Pulse Peak を Fitting した結果を図 C.1 に示す。また、Fitting で求められる各 Peak 位置を図 C.2、基準となる電波放射時刻からのずれを表 C.1 に示す。表 C.1 より、各 Fitting で求まる電波からの時刻ずれは、どの検出器でも最大差が約 3 % 以内に収まっていることがわかる。

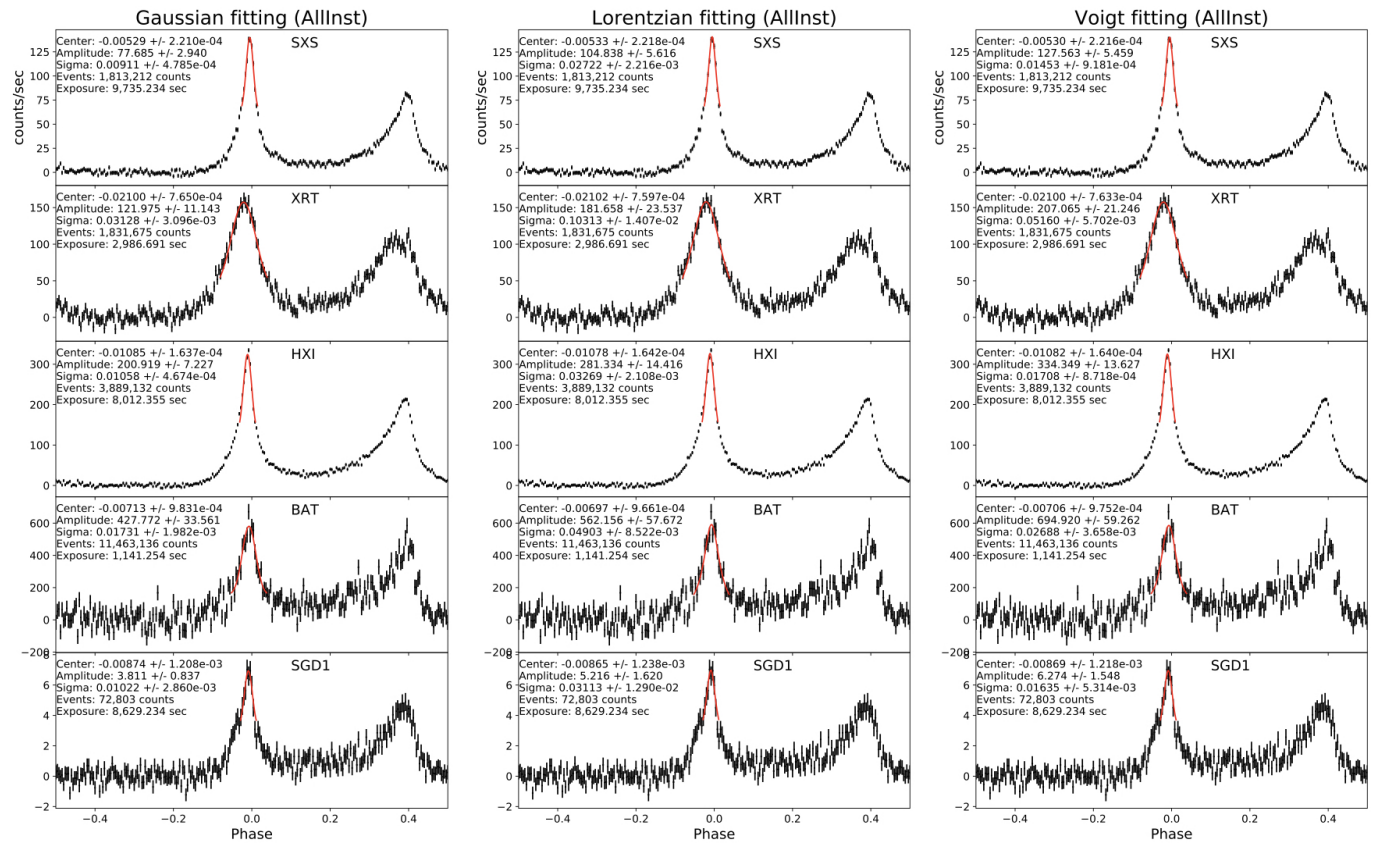


図 C.1: 各関数での Fitting 結果

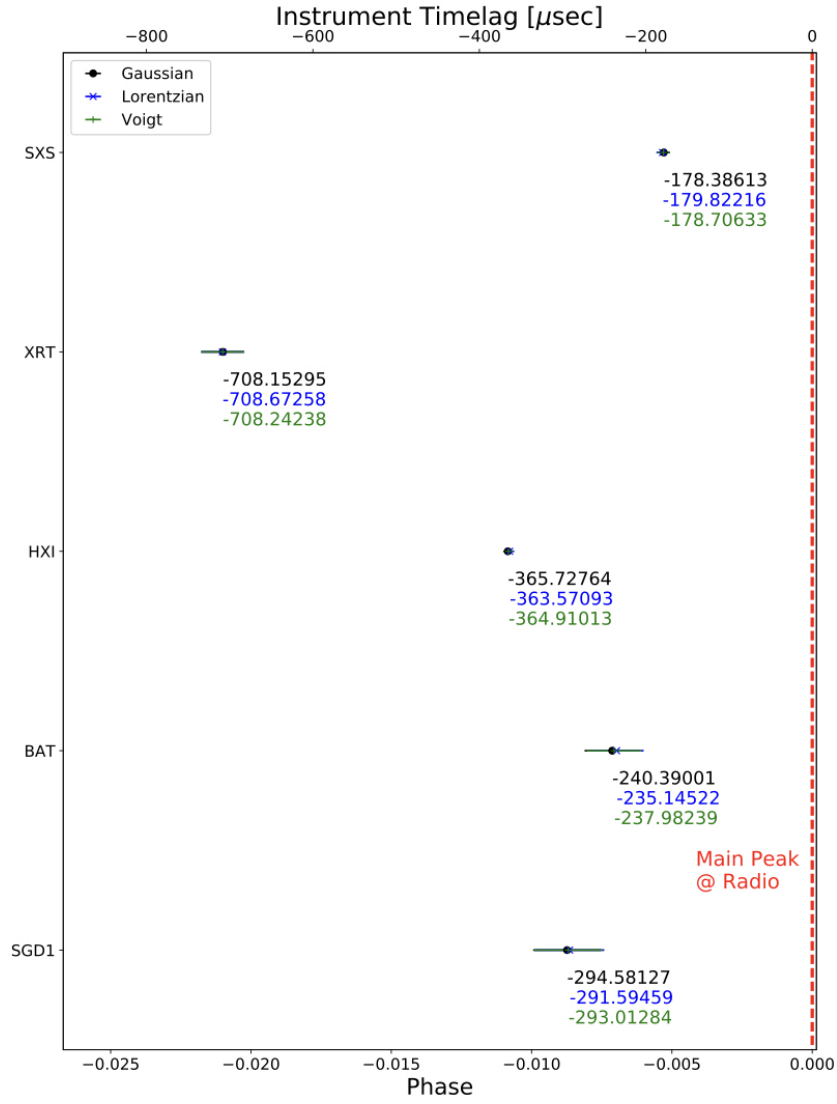


図 C.2: 各 Fitting で決定された Pulse Peak 位置。黒: Gauss 関数、青: Lorentz 関数、緑: Voigt 関数

表 C.1: 各 Fitting 毎の電波時刻からのずれ差

	Gauss 関数	Lorentz 関数	Voigt 関数	最大時刻差 [%]
SXS	-178.38613	-179.82216	-178.70633	0.8
XRT	-708.15295	-708.67258	-708.24238	0.07
HXI	-365.72764	-363.57093	-364.91013	0.6
BAT	-240.39001	-235.14522	-237.98239	2.2
SGD1	-294.58127	-291.59459	-293.01284	1.0

付録 D GRP 解析の詳細

SXS

GRP type	cycle number	event 数 [counts]	cycle 数 [cycles]	exposure [sec]
MP	0	7,429	2,234	39.486
MP	+1	22,186	4,522	117.334
MP	+2	36,297	6,663	192.245
MP	+3	49,793	8,760	264.290
MP	+4	62,362	10,732	332.594
MP	+5	74,594	12,638	398.174
MP	+6	86,202	14,488	461.429
MP	+7	97,619	16,263	522.711
MP	+8	108,501	17,979	581.371
MP	+9	118,975	19,622	638.036
MP	+10	129,031	21,218	692.656
MP	+11	138,892	22,755	745.535
MP	+12	148,408	24,234	796.309
MP	+13	157,533	25,647	845.147
MP	+14	166,464	27,011	892.041
IP	0	704	153	3.473
IP	+1	2,014	347	10.420
IP	+2	3,339	557	17.366
IP	+3	4,650	775	24.312
IP	+4	5,896	969	31.259
IP	+5	7,240	1,172	38.205
IP	+6	8,545	1,376	45.152
IP	+7	9,859	1,583	52.098
IP	+8	11,121	1,792	58.910
IP	+9	12,362	1,986	65.721
IP	+10	13,616	2,191	72.515
IP	+11	14,877	2,384	79.293
IP	+12	16,120	2,593	86.071
IP	+13	17,422	2,785	92.748
IP	+14	18,655	2,991	99.390
No MP	out of +-14	242,532	38,776	1289.719
No IP	out of +-14	390,341	61,655	2082.369

HXI (1 & 2, reg1)

GRP type	cycle number	event 数 [counts]	cycle 数 [cycles]	exposure [sec]
MP	0	15,770	1,883	31.865
MP	+1	46,479	3,713	94.686
MP	+2	75,984	5,470	155.076
MP	+3	104,285	7,147	213.094
MP	+4	131,271	8,745	268.246
MP	+5	157,296	10,281	321.053
MP	+6	182,282	11,768	371.933
MP	+7	206,604	13,199	421.177
MP	+8	229,659	14,575	468.390
MP	+9	252,183	15,907	514.115
MP	+10	273,827	17,194	558.180
MP	+11	294,701	18,436	600.809
MP	+12	314,753	19,628	641.813
MP	+13	334,024	20,766	681.199
MP	+14	352,187	21,869	718.786
IP	0	1,373	151	2.866
IP	+1	4,145	325	8.599
IP	+2	6,928	495	14.331
IP	+3	9,818	664	20.064
IP	+4	12,650	840	25.796
IP	+5	15,494	1,007	31.529
IP	+6	18,342	1,173	37.261
IP	+7	21,154	1,342	42.994
IP	+8	23,848	1,508	48.591
IP	+9	26,626	1,678	54.189
IP	+10	29,404	1,836	59.769
IP	+11	32,109	2,004	65.333
IP	+12	34,871	2,174	70.896
IP	+13	37,537	2,332	76.359
IP	+14	40,173	2,499	81.788
No MP	out of +14	486,086	29,954	991.030
No IP	out of +14	798,100	48,361	1628.028

SGD1 (photo-absorption)

GRP type	cycle number	event 数 [counts]	cycle 数 [cycles]	exposure [sec]
MP	0	322	287	38.441
MP	+1	984	862	114.333
MP	+2	1,660	1,459	187.390
MP	+3	2,280	1,997	257.783
MP	+4	2,875	2,519	324.569
MP	+5	3,460	3,026	388.698
MP	+6	3,980	3,484	450.572
MP	+7	4,547	3,982	510.538
MP	+8	5,117	4,454	567.951
MP	+9	5,587	4,863	623.368
MP	+10	6,088	5,294	676.740
MP	+11	6,532	5,681	728.372
MP	+12	6,957	6,065	777.966
MP	+13	7,376	6,413	825.691
MP	+14	7,761	6,743	871.472
IP	0	28	27	3.406
IP	+1	85	76	10.217
IP	+2	136	123	17.029
IP	+3	196	177	23.840
IP	+4	275	244	30.652
IP	+5	328	292	37.463
IP	+6	392	350	44.275
IP	+7	444	394	51.086
IP	+8	511	452	57.768
IP	+9	562	496	64.479
IP	+10	617	541	71.171
IP	+11	671	586	77.848
IP	+12	730	642	84.524
IP	+13	784	689	91.100
IP	+14	835	729	97.642
No MP	out of +14	11,049	9,571	1259.294
No IP	out of +14	17,975	15,576	2033.124

XRT

GRP type	cycle number	event 数 [counts]	cycle 数 [cycles]	exposure [sec]
MP	0	20,714	1,879	31.990
MP	+1	60,416	3,690	94.064
MP	+2	99,032	5,452	154.210
MP	+3	136,449	7,143	212.356
MP	+4	172,081	8,772	268.277
MP	+5	206,233	10,323	321.851
MP	+6	239,373	11,826	373.237
MP	+7	271,075	13,270	422.873
MP	+8	301,929	14,665	470.625
MP	+9	331,713	16,015	517.000
MP	+10	360,075	17,295	561.219
MP	+11	387,204	18,527	603.522
MP	+12	413,511	19,719	644.387
MP	+13	439,197	20,873	683.818
MP	+14	463,854	21,986	722.079
IP	0	1,765	152	2.728
IP	+1	5,304	313	8.157
IP	+2	8,747	477	13.586
IP	+3	12,160	636	19.015
IP	+4	15,710	792	24.444
IP	+5	19,069	953	29.873
IP	+6	22,548	1,116	35.302
IP	+7	26,029	1,278	40.731
IP	+8	29,488	1,432	46.109
IP	+9	32,916	1,598	51.437
IP	+10	36,191	1,749	56.697
IP	+11	39,582	1,905	61.958
IP	+12	42,903	2,059	67.218
IP	+13	46,303	2,219	72.478
IP	+14	49,786	2,377	77.739
No MP	out of +-14	677,577	31,535	1042.876
No IP	out of +-14	1,091,645	50,183	1687.216

BAT

GRP type	cycle number	event 数 [counts]	cycle 数 [cycles]	exposure [sec]
MP	0	208,813	1,219	20.771
MP	+1	614,002	2,389	60.958
MP	+2	1,004,038	3,529	99.860
MP	+3	1,378,965	4,611	137.313
MP	+4	1,736,263	5,643	172.928
MP	+5	2,074,595	6,617	206.606
MP	+6	2,397,907	7,561	238.839
MP	+7	2,710,375	8,474	270.114
MP	+8	3,013,335	9,354	300.281
MP	+9	3,308,499	10,207	329.593
MP	+10	3,587,073	11,006	357.324
MP	+11	3,852,263	11,776	383.760
MP	+12	4,107,689	12,520	409.283
MP	+13	4,354,865	13,239	433.843
MP	+14	4,594,419	13,926	457.583
IP	0	19,031	112	1.885
IP	+1	56,701	223	5.628
IP	+2	94,227	334	9.371
IP	+3	131,609	445	13.114
IP	+4	169,086	556	16.857
IP	+5	206,661	667	20.600
IP	+6	244,183	778	24.343
IP	+7	281,289	889	28.086
IP	+8	318,036	998	31.778
IP	+9	354,564	1,105	35.420
IP	+10	389,709	1,211	38.994
IP	+11	425,030	1,317	42.568
IP	+12	460,919	1,423	46.143
IP	+13	496,392	1,529	49.717
IP	+14	531,954	1,635	53.291
No MP	out of +14	5,953,506	17,957	592.571
No IP	out of +14	10,015,969	29,676	996.863

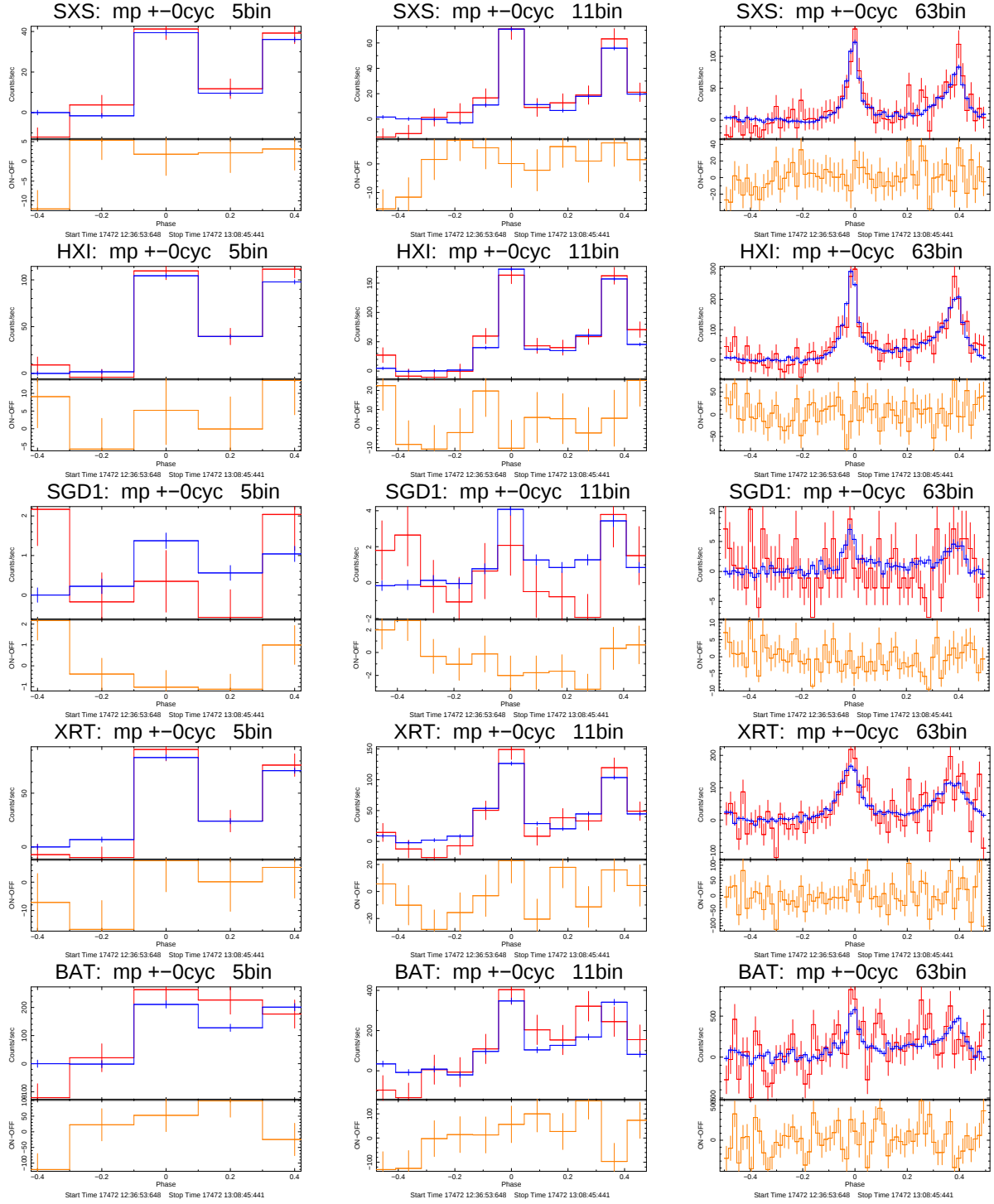


図 D.1: GRP 発生 cycle の各検出器の畳み込みライトカーブ MP-GRP (1/5, 1/11, 1/63 Phase bin)

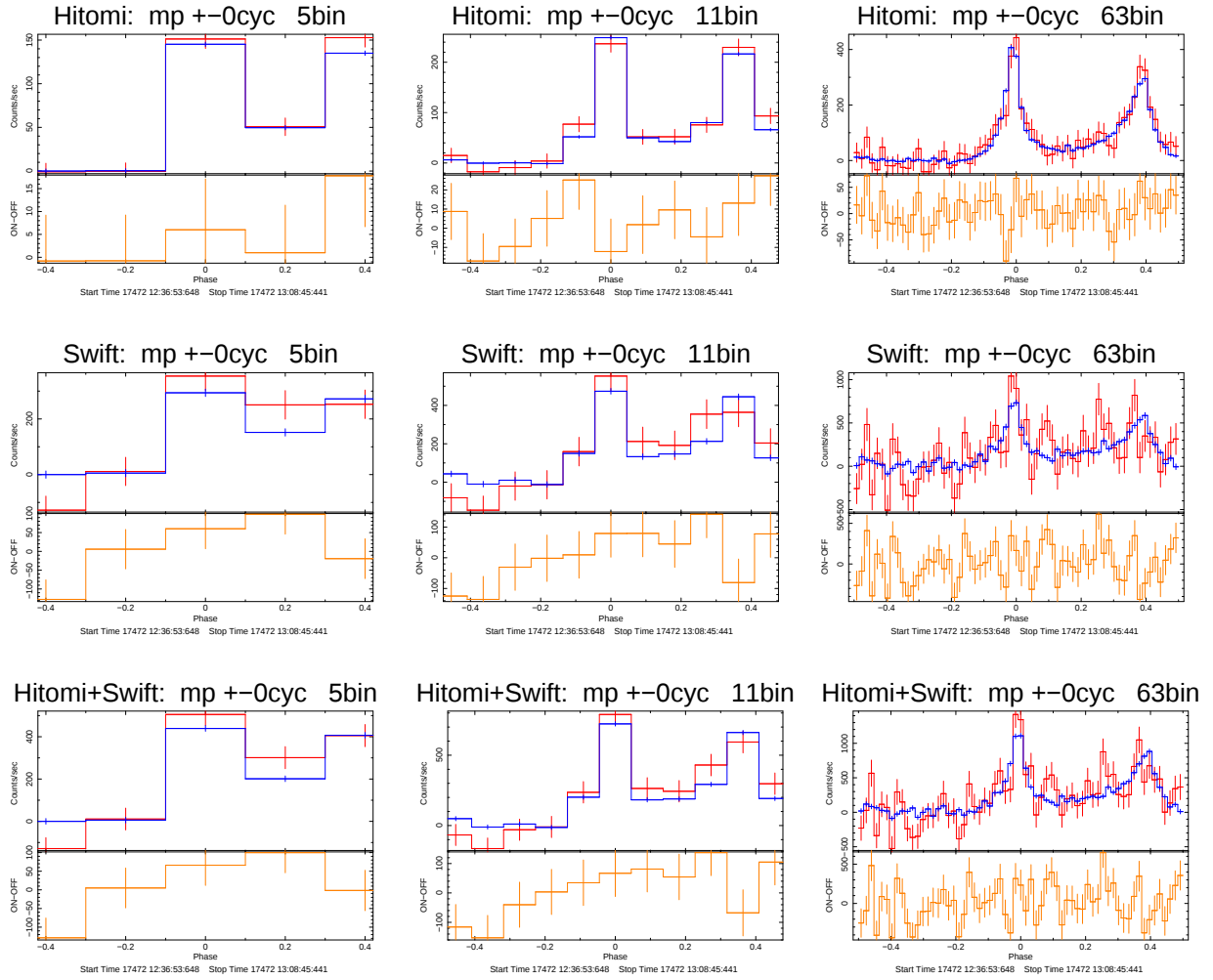


図 D.2: 検出器を足し合わせた GRP 畳み込みライトカーブ MP-GRP (1/5, 1/11, 1/63 Phase bin)

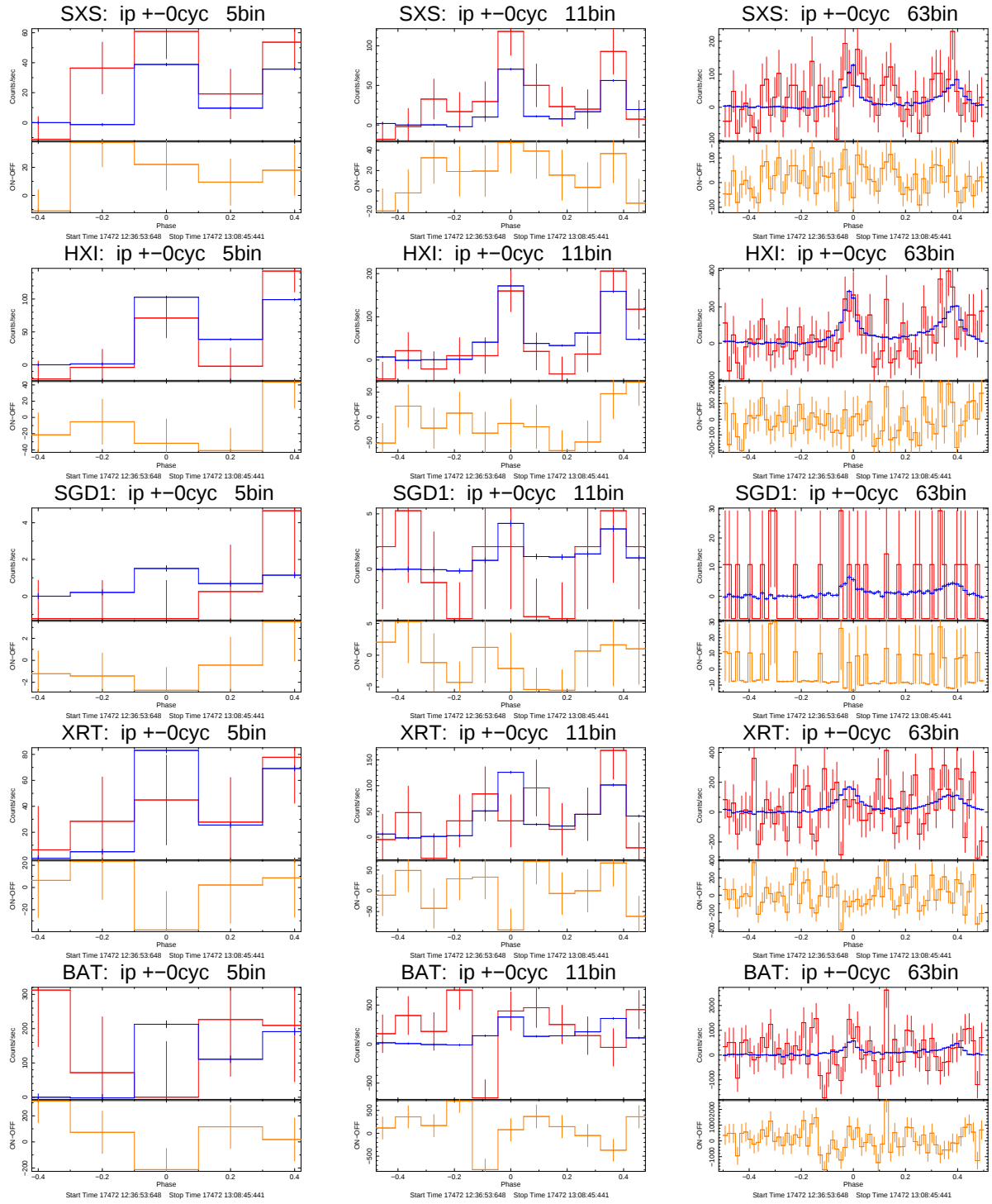


図 D.3: GRP 発生 cycle の各検出器の畳み込みライトカーブ IP-GRP (1/5, 1/11, 1/63 Phase bin)

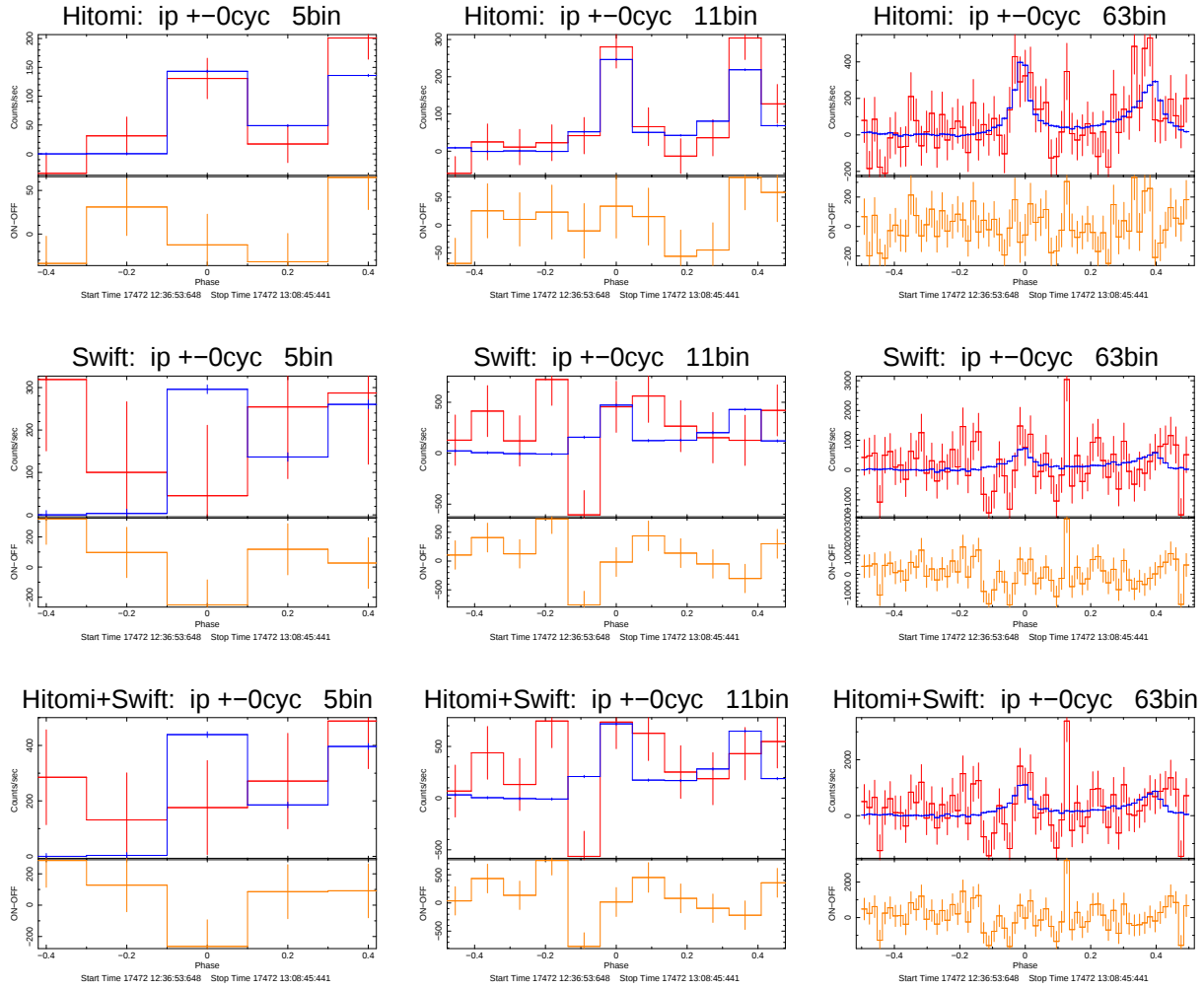


図 D.4: 検出器を足し合わせた GRP 畳み込みライトカーブ IP-GRP (1/5, 1/11, 1/63 Phase bin)

謝辞

本論文を執筆するにあたり、ご指導とご協力くださったみなさまに心から感謝申し上げます。学部頃から約3年間ご指導頂きました、田代先生、寺田先生には大変お世話になりました。研究に対してのたくさんのコメント、ご指導を受けながら、衛星開発という大規模なプロジェクトにも関わらせていただきました。そのおかげで学業面だけでなく、チームの中で協力して成し遂げるということを学び、厳しい現実社会に出る前に大きく成長できたと思います。本当にありがとうございました。田代先生はお忙しい中でもいつも私の研究を真摯に見ていただきました。お酒の席ではいつもおもしろい話が聞けてとても楽しかったです。XARMと浦和の赤い軍団の今後の発展をお祈り申し上げます。指導教官である寺田先生には素直に頭が上がりません。未熟な私をいつもサポートしていただき、本当にありがとうございました。サンフランシスコでのデートは良い思い出です。またお酒の席で会いましょう。短い間ではありましたが、佐藤先生、勝田先生にもお世話になりました。お二人の加入によりミーティングでの議論が厚みを増しとても勉強になりました。もう少し一緒にいて白熱した議論や積もる話もしたかったです。それは又の機会のお酒の席ということで、よろしくお願いします。寺澤先生を始め Crab GRP 解析チームの方々にもお世話になりました。解析方法もわからず戸惑ってばかりの私でしたが、最前線の議論に関わらせていただいたのは貴重な経験になりました。ありがとうございました。研究室の方々にも大変お世話になりました。研究室に入りたての頃、安田さん、武田さん、永吉さんは研究者としてのオーラがあって憧れの存在でした。先輩方とは短い期間でしたが、気軽に質問に答えていただきとても勉強になりました。ミュンヘン帰りの永吉さんとはミュンヘンの期間が長かったのであまり話せませんでしたが、もっと一緒に飲んだりミュンヘンの話を聞きたかったです。同じ時刻付けチームの先輩である中谷さんは、振り向けばいつも熱心に教えてくれるとてもいい先輩でした。たまによくわからない奇行もありましたが、中谷さんとの研究生活は刺激的でとても楽しくて、思い出すと涙がちょちょぎれそうになります。また、中谷さん世代のみなさんにもたくさん面倒を見ていただきました。本当に個性的な方々で、毎日がとても楽しかったのをよく覚えています。またみなさんと飲みにいきたいです。ひとみチームである矢部さん、加藤さんとは一緒にご飯に行ったり、飲みに行ったり、実は同期よりも濃密な時間を過ごしたかと思っています。生意気な私ではありますが、今後とも飲みに行けたらいいなと思っています。Crabの解析を共に行った高見くんには感謝の気持ちでいっぱいです。0からのスタートで試行錯誤の毎日でしたが、議論しながら前進した毎日はとても良い思い出です。高橋くんは一年間隣の席でずっと奇声を上げていましたが、ひとみチームでも研究室内でも率先して仕事に取り組んでいて、私も助けられることが多かったのです。ギャグとともにもっと評価されるべき奇人だと、私は思います。じゃない方の安田くんは、そんな奇人高橋と変人大清水の下で熱心に勉強していた一番の変わり者でした。過酷な環境を耐え抜いた安田くんなら、最強のヒーローになれると信じています。勝倉さんは短い間でしたが、研究の相談に乗っていただいたり、毎日コーヒーをご馳走になりました。改めて博士学生がいることの強みを、コーヒーとともに感じる一年だったと思います。山賊ではありましたが頼りがいのある良い先輩でした。同期の西山くんとは常連認定目指して同じカレー屋によく一緒に行きました。森田さんは逆に違うカレー屋によく行ってました。みんなカレーが大好きで素晴らしい同期だと思います。将棋やイギリスで多忙だとは思いますが、たまには会って話せたらいいもんですね。一つ下の後輩たちも、みんなそれぞれスーパーパワーを持っている濃い面子でした。女の子がいない最悪の世代なんて(基本僕から)呼ばれてましたが、サーバー故障を始め、様々な困難があってもめげずに乗り越えられたのは6人の勇者のおかげだと思っています。これからも個性を生かして仲良く頑張ってください。あと、沼田くんにもよろしく言っといてください。B4のみなさまには、汚い言葉ばかり投げてしまい、心から土下座します。優秀な後輩に嫉妬してしまったんです。許してください。ケチとか言わないでください。そして、ありがとうございました。これからの田代寺田佐藤勝田研は、最前線で活躍する教授陣と熱意のある優秀な学生のみなさまでどんどん盛り上がっていくと思います。私はこの素晴らしい研究室でたくさんの思い出を頂いたことを、心から感謝致します。最後になりますが、ここまで支えてくれた両親と、いつも応援してくれた祖父母に感謝の意を表して謝辞と致します。

平成30年2月5日 大清水 健也